INVESTIGACION y CIENCIA

UNIFICACION DE LAS FUERZAS FUNDAMENTALES

NEUROBIOLOGIA DE LA DEPRESION

EL ALCOHOL EN EL MUNDO OCCIDENTAL

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

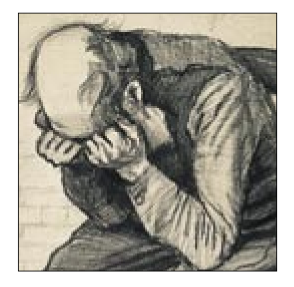
CUASARES



AGOSTO 1998
800 PTAS.

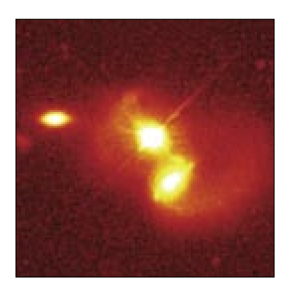


Agosto de 1998 Número 263


4 

Neurobiología de la depresión
Charles B. Nemeroff

Sea cual sea su causa, la depresión surge en última instancia de cambios bioquímicos en el cerebro que provocan una profunda tristeza, pérdida de gusto por las cosas, culpabilidad, pensamientos de muerte y otros síntomas. La investigación sobre los fundamentos neurológicos permite abrigar esperanzas sobre un tratamiento más eficaz.

14 

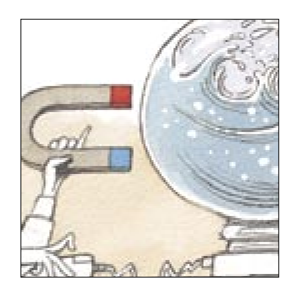
Una nueva mirada a los cuásares
Michael Disney

Los cuásares, los objetos más luminosos del universo, apenas si superan el tamaño de nuestro sistema solar. Confirmar su mera existencia constituyó un duro reto para la física. Parece que la mayoría de los cuásares saca su energía de la absorción de estrellas enteras por un agujero negro en el interior de galaxias que chocan, pero quedan aún muchas incógnitas.

22 

Acuicultura de camarones y ambiente
Claude E. Boyd y Jason W. Clay

Criar camarones y langostinos en estanques elimina la muerte indiscriminada de otras especies marinas que produce la pesca de arrastre. Por desgracia, la práctica genera sus propios problemas ambientales. En este artículo, un acuicultor y un conservacionista explican la transformación de la acuicultura de peneidos en empresa respetuosa con el medio.

44 

Computación cuántica con moléculas
Neil Gershenfeld e Isaac L. Chuang

Nuestros superordenadores más veloces tardarían miles de millones de años en descomponer en factores primos un número de 400 dígitos. De ese tenor son los desafíos que plantea el desciframiento criptográfico. Sin embargo, con un tipo de ordenador de invención reciente, fundado en interacciones cuánticas, podría ejecutarse la tarea en un año.

50 

Gradiometría de gravedad
Robin E. Bell

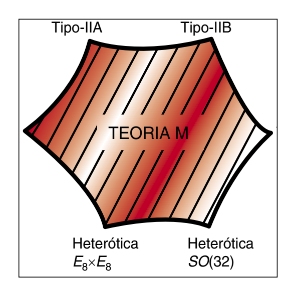
Las pequeñas alteraciones de la atracción gravitatoria a lo ancho de un paisaje pueden alertar a los geólogos de la existencia de depósitos minerales o petrolíferos enterrados. Antes no era práctico cartografiar esas variaciones minúsculas, pero unos nuevos sensores que se crearon para los submarinos durante la guerra fría han renovado el interés por dicha técnica.

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

56 

El alcohol en el mundo occidental
Bert L. Vallee

La humanidad lleva más de diez mil años degustando el alcohol para aliviar la sed y puede que para algo más. Hubo un tiempo en que el agua potable casi no existía y las bebidas fermentadas tenían la ventaja de ser seguras y nutritivas. La cambiante historia del alcohol desde sus orígenes hasta nuestros días.

62 

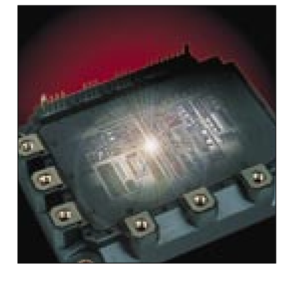
Unificación y dualidad en teoría de cuerdas
Luis E. Ibáñez Santiago

Uno de los objetivos codiciados por los físicos desde hace más de cien años es la consecución de una teoría última de todas las leyes de la naturaleza. Las teorías de cuerdas son las más firmes candidatas para lograr una descripción unificada de todas las interacciones fundamentales. Constituyen, sin embargo, aspectos parciales de la teoría M.

70 

Desfibrilación y reanimación
Mickey S. Eisenberg

Los desfibriladores eléctricos sacuden los corazones en caótica convulsión para ayudarlos a recobrar el orden. La evolución continua de estos dispositivos, cada vez más fáciles de usar y de transportar, deberá salvar aún más vidas. En su colaboración complementaria, Carl E. Bartecchi describe cómo responder a una urgencia cuando no se tiene un desfibrilador a mano.

76 

Así funciona el supertransistor
B. Jayant Baliga

Aunque raras veces se reconozca, la invención del transistor en los Laboratorios Bell, allá por los años cincuenta, provocó una doble revolución: primera, la progresiva miniaturización; segunda, el desarrollo de transistores de magnitud creciente, capaces de manejar mayores potencias eléctricas. El transistor bipolar de puerta aislada está transformando la electrónica de potencia.

SECCIONES

3 Hace...

30 Perfiles

32 Ciencia y sociedad

42 De cerca

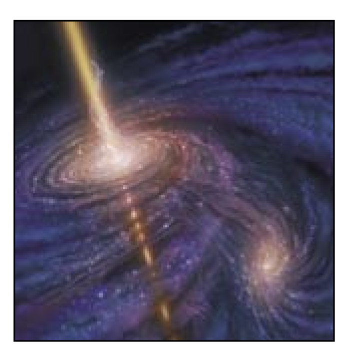
84 Taller y laboratorio

86 Juegos matemáticos

88 Nexos

90 Libros

96 Ideas aplicadas



Portada: Recreación artística de Don Dixon

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	Museo Van Gogh/Fundación Vincent Van Gogh, Amsterdam; extraído de *Darkness Visible* © 1990 Random House (*contraportada*)
6	Jennifer C. Christiansen
7	Carol Donner
8-9	Tomo Narashima
10-11	Lewis R. Baxter, Jr., © 1985 *Archives of General Psychiatry* (*izquierda*); Wayne C. Drevets
14-15	Don Dixon (*izquierda*); John Bahcall, Instituto de Estudios Avanzados y NASA (*derecha*)
16-17	Laurie Grace (*arriba*); John Bahcall y NASA (*abajo a* y *b*), Michael Disney y NASA (*c*) y Kim McLeod y NASA (*d*)
18	Cortesía de Holland Ford; Observatorio Nacional de Astronomía Optica y NASA; Laurie Grace (*gráfica*)
22	Roberto Osti (*ilustración*); Conner Bailey (*fotografía*)
24	C.C. Lockwood, *Bruce Coleman Inc.*
25	Roberto Osti (*arriba*); Cortesía de Harlingen Shrimp Farms (*centro, izquierda*); Conner Bailey (*centro, derecha* y *abajo, izquierda*) y Alfredo Quarto (*abajo, derecha*)
26-27	Mickey Gibson, *Earth Scenes* (*arriba, izquierda*); Alfredo Quarto (*arriba, derecha*); Jennifer C. Christiansen; *fuente*: FAO (*abajo*)
28	Cortesía de Claude E. Boyd
29	Cortesía de Jason W. Clay
44-45	Dusan Petricic
46	Dusan Petricic; Neil Gershenfeld y Yael Maguire (*recuadro*)
47-49	Dusan Petricic
51	Instituto de Geofísica Eötvös Loránd
52	Mark Gerber
53	Mark Rankin (*izquierda*), Lockheed Martin Federal Systems (*derecha*)
54	Mark Gerber
55	Fuente: Robin E. Bell
56-57	Bryan Christie
58	Bryan Christie; fuente: *Food: The Gift of Osiris, Vol. 2, Academic Press, 1977*
59	Steve Borack (*fotografía de la edición 1512*); Biblioteca de Medicina F. A. Countway
60	*Journal of studies on alcohol*, Universidad Rutgers
61	Biblioteca del Congreso
62-69	Luis E. Ibáñez Santiago
70-71	Lien/Nibauer Photography
72	*Arizona Medicine* (*izquierda*), Upi/Corbis-Bettmann (*derecha*)
73	*Journal of the American Medical Association* (*arriba*), Bryan Christie (*abajo*)
74-75	Dana Burns-Pizer
76-77	Tony Stone Images (*izquierda*), Fuji Electric Co. Ltd. (*inserto*), Kim Kulish (*arriba derecha*), Black & Decker (*centro izquierda*), Crandall *Image Works* (*centro derecha*), Mark Joseph (*abajo*)
78-79	Jared Schneidman Design
80	Heartstream
81	Jared Schneidman Design
82	Timothy Archibald

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Esteban Santiago: *Neurobiología de la depresión*; Mónica Murphy: *Una nueva mirada a los cuásares*; Joandomènec Ros: *Acuicultura de camarones y ambiente*; M.ª Victoria Gracia: *Computación cuántica con moléculas*; Juan Pedro Campos: *Gradiometría de gravedad*; Carmina Fuster: *El alcohol en el mundo occidental*; Ana M.ª Rubio: *Desfibrilación y reanimación*; Luis Bou: *De cerca* y *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; Carol Ezzell; W. Wayt Gibbs; Alden M. Hayashi; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; y Glenn Zorpette
Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.150	20.700

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

IDIOMA APÍCOLA. «Karl von Frisch, en sus estudios sobre las abejas melíferas, descubrió que las que regresan de una fuente alimentaria ejecutan para el resto de la colmena unos movimientos especiales, que él llamó danzas. De éstas distinguió dos clases: la circundación (*Rundtanz*), en que la abeja describe círculos, y el contoneo (*Schwännzeltanz*), cuando se mueve hacia adelante, agitando el abdomen y gira. Demostró von Frisch que la circundación sirve para indicar que la fuente está a menos de unos 100 metros, en tanto que en la danza de contoneo la frecuencia de giros revela la distancia. Si la fuente se halla a unos 100 metros, la abeja ejecuta unas diez vueltas cortas en 15 segundos. Para indicar una distancia de 3000 metros, ejecutó sólo tres vueltas largas en el mismo tiempo.»

Un hombre notable en su máquina voladora

HIPERTENSIÓN. «Crece la preocupación frente a la vulnerabilidad a la alta presión sanguínea y al endurecimiento de las arterias. Los certificados de defunción muestran que la asociación de ambos trastornos matan del orden de 600.000 personas al año en Norteamérica. Desde el siglo XVIII, la esperanza de vida ha subido en EE.UU. de los 39 a los 57 años, fundamentalmente gracias a la victoria sobre la viruela, el tifus, la tuberculosis, la peste, la difteria y, más recientemente, la neumonía y las infecciones estreptocócicas. El retroceso de esas enfermedades ha permitido que la gente viva hasta las edades en que la hipertensión y la arteriosclerosis se cobran más víctimas.»

...cien años

TRABAJOSA LABOR ESCOLAR. «Se ha considerado un método de enseñanza educativa perfectamente adecuado el atiborrar y recargar sus cerebros con una cantidades de materias de digestión difícil y de poca aplicación después en la vida. Muchos niños delicados y de temperamento nervioso se han derrumbado ante el esfuerzo; los terribles deberes diarios han desarrollado muchas de las enfermedades nerviosas a las que la actual generación es tan susceptible. No obstante, los americanos se están percatando de los perniciosos efectos de desarrollar la mente a expensas del cuerpo; en los diez años desde que se introdujo la gimnasia alemana, la preparación física ocupa un lugar en los planes de estudio de la mayoría de las instituciones de enseñanza más importantes.»

¿MULTIPLEXADO PRECURSOR? «El inventor monsieur Mercadier no ceja en sus experimentos en la línea París-Burdeos. Provistos de unos interesantes instrumentos, llamados duodecaplex, doce transmisores Morse pueden trabajar simultáneamente sobre un solo conductor, enviando cada uno sus señales al receptor correcto al otro extremo de la línea. Cada transmisor recibe una corriente a través de un diapasón que emite una nota especial, y cuya vibración se mantiene eléctricamente. Esas vibraciones provocan la resonancia en el circuito receptor adecuado. La separación de la señales parece que es perfecta, sin que ningún receptor acuse señales no destinadas a él.» [*Nota de la redacción: Este instrumento presagia las técnicas de multiplexado empleadas en los sistemas de voz analógicos y digitales*.]

OPTICA MEJOR. «Los nuevos gemelos de campaña Zeiss, fabricados por Bausch & Lomb Optical Company, de Rochester (Nueva York), son invención del profesor Ernst Abbe, de Jena, a quien la ciencia de la óptica debe tantos progresos. Los tres principales defectos de los gemelos de campaña ordinarios se corrigen merced al uso de dos parejas de prismas, que enderezan la imagen invertida formada por el objetivo, acortan en dos tercios el telescopio y separan más los objetivos que la distancia entre los oculares, con lo que aumenta el efecto estereoscópico.»

UNA IDEA PARA VOLAR. «¿Permitirá al fin el 'Avión', un aparato ideado y construido por monsieur Clément Ader, ingeniero francés, que el hombre haga realidad el sueño de Icaro? Quizá. Ader ha abandonado las superficies planas del aparato de Maxim y Richet y las ha sustituido por superficies encorvadas. Las alas, empalmadas en todas su partes, sirven para la sustentación y no baten. En la versión que ilustramos, la envergadura es de casi 15 m. La potencia motriz es suministrada por vapor, empleándose alcohol como combustible.»

...ciento cincuenta años

BUMERÁN ABORIGEN. «El bumerán es un curioso instrumento que los negros australianos emplean como arma ofensiva; en sus manos, ejecuta las acciones más prodigiosas y maravillosas. En sí el instrumento es un trozo de madera delgado y curvo de hasta casi un metro de longitud y unos cinco centímetros de ancho, con un canto levemente redondeado y el otro muy plano. Un aborigen puede arrojar semejante arma de modo que describa una circunferencia completa en el aire, cuyo perímetro muchas veces es del orden de los doscientos cincuenta metros.»

Neurobiología de la depresión

En los últimos años se ha intensificado la búsqueda de las bases biológicas de la depresión, gracias a cuya investigación empiezan a configurarse planteamientos prometedores para el futuro de una enfermedad a menudo letal

Charles B. Nemeroff

En *Visible oscuridad*, libro autobiográfico, recuerda el novelista William Styron con trazos escalofriantes el estado de su mente durante una fase de depresión:

> El psiquiatra me preguntó entonces si tenía tendencias suicidas. A regañadientes, le contesté que sí. No entré en detalles; me pareció que era superfluo. Así, no le conté que muchas cosas de la casa se habían convertido en instrumentos potenciales de mi propia destrucción: en las vigas del ático (y un par de árboles del jardín) veía el poste donde colgarme; en el garaje, el lugar para inhalar monóxido de carbono; en la bañera, donde desangrarme por las venas cortadas. Los cuchillos alineados en el mueble de la cocina señalaban un solo camino. Me atraía con intensidad la muerte por infarto, que me liberaría de tomar una decisión. Había incluso acariciado la idea de buscarme una pulmonía paseándome por el bosque en mangas de camisa un día lluvioso y crudo de invierno. Tampoco había descartado un accidente, lanzándome bajo las ruedas de un camión... Entre fantasías de tan espeluznante jaez —que escandalizarían a cualquier persona normal— se debate la mente de quien sufre una depresión profunda, con algún paralelo quizá con los obsesos sexuales y su imaginación lasciva irrefrenable.

CHARLES B. NEMEROFF ocupa la cátedra Reunette W. Harris de la facultad de medicina de la Universidad de Emory, cuyo departamento de psiquiatría y ciencias del comportamiento dirige.

Del pasaje se desprende que la depresión clínica difiere por completo de la sensación de tristeza que a veces nos invade y del dolor que produce la muerte de un ser querido. Es mucho más extenuante y peligrosa. Esa tristeza profunda va, además, acompañada de diversos síntomas. Junto a las ideas suicidas, algunas personas experimentan un sentimiento de culpabilidad o de inutilidad. A menudo la mente se torna en blanco, con dificultad para pensar o recordar, perdiéndose interés por lo que se hace. Amén de una sensación de ansiedad o de falta de energía vital característica, cuesta comer o dormir, cuando no se cae en el extremo opuesto de comida y descanso excesivos.

Se debate a veces si una experiencia negativa contra el propio yo, los pensamientos de autocensura o ciertos procesos biológicos pueden desembocar en una depresión. Puesto que la mente necesita del cerebro, los datos señalan que, al margen de los mecanismos desencadenantes, en los últimos tramos que llevan a la depresión han de intervenir cambios bioquímicos de dicho órgano. Son estos cambios los que en última instancia explican esa tristeza profunda y otros rasgos distintivos de la depresión. El alcance de estas alteraciones sigue siendo objeto de estudio. Sin embargo, sólo en los últimos años se ha progresado en su identificación.

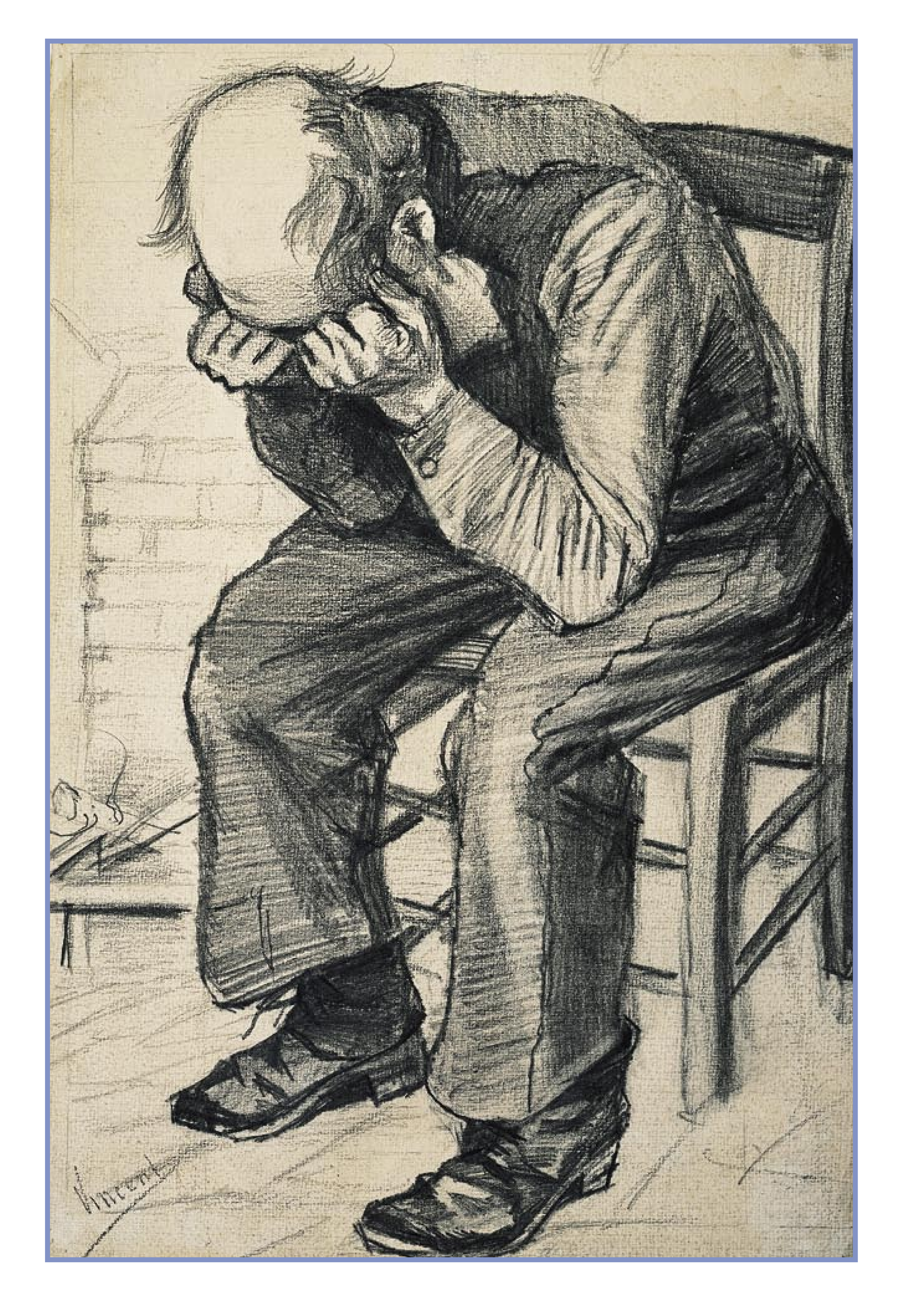
Por decirlo de una manera gráfica, quienes se esfuerzan por desenredar la madeja de la neurobiología de la depresión vienen a ser investigadores ciegos que, tras palpar una misteriosa criatura, pretenden luego armonizar sus deducciones. Podría ocurrir que todos nuestros hallazgos acaben entrecruzándose. Las irregularidades bioquímicas acentuadas en unos depresivos difieren de las exageradas en otros. Además, la acumulación extraordinaria de datos está generando un optimismo de que los determinantes biológicos de la depresión terminarán por manifestarse; con ello se abrirá el camino para mejorar los métodos de diagnóstico, tratamiento y prevención de la enfermedad.

Se propone la investigación poder distinguir los rasgos que varían de un enfermo deprimido a otro. La actividad disminuida de un neurotransmisor específico (la molécula portadora de la señal entre células nerviosas) podría ser, quizá, clave en una persona, mientras que, en otra, podría tener mayor peso la hiperactividad de un sistema hormonal (las hormonas circulan por la sangre y pueden actuar lejos del lugar donde se segregan).

Junto a ese objetivo, hemos de citar otro a él vinculado: descubrir marcadores biológicos, sencillos y dotados de capacidad para indicar qué perfil encaja en un paciente determinado; esos marcadores podrían consistir, por ejemplo, en un incremento (o disminución) del nivel de ciertos metabolitos en la sangre, o ser cambios operados en áreas perceptibles del cerebro.

Con los resultados de tales análisis, el psiquiatra podría, en teoría, prescribir la medicación adecuada para la anomalía biológica de su paciente, ni más ni menos que el médico de cabecera cuando, tras realizar las

1. *ANCIANO CON LA CABEZA ENTRE LAS MANOS*, boceto de Vincent van Gogh de 1882. Guarda estrecha semejanza con el cuadro *Anciano hundido en la tristeza* que el artista pintó en 1889. La imagen podría reflejar la depresión que el propio van Gogh arrastró a lo largo de su vida y le llevó al suicidio en 1890.


Vincent

Sintomatología de la depresión grave

La Asociación de Psiquiatría Americana considera que una persona tiene el síndrome de depresión clínica si muestra, por lo menos, cinco de los síntomas adjuntos, de forma ininterrumpida y a lo largo de un período de dos semanas. Los síntomas deben causar un pesar profundo o una alteración significativa de la actividad diaria, sin que guarden relación con la medicación, consumo de drogas, una enfermedad (patologías del tiroides) o la pérdida de un ser querido.

—C.B.N

- ☐ Animo deprimido la mayor parte del día (en el niño y adolescente, la irritabilidad puede significar un ánimo deprimido)
- ☐ Notable disminución del interés o gusto en todas o en la mayoría de las actividades diarias
- ☐ Aumento o una disminución desproporcionados del apetito
- ☐ Insomnio o sueño excesivo
- ☐ Agitación (evidente por el modo de frotarse las manos) o lentitud en los movimientos
- ☐ Cansancio inexplicable o pérdida de energía
- ☐ Sentimientos de inutilidad o de culpabilidad
- ☐ Indecisión o capacidad disminuida para pensar o concentrarse
- ☐ Pensamientos recurrentes de muerte o de suicidio

pruebas pertinentes para detectar el estreptococo en un individuo aquejado de dolor de garganta, receta el antibiótico oportuno. Los psiquiatras han de elegir la medicación antidepresiva apoyados en su buen ojo o en métodos de ensayo y error, una situación ésta que puede dejar inerme, semanas o meses, a un paciente con ideas suicidas antes de dar con el fármaco adecuado. (A menudo se necesita también la psicoterapia, que no basta por sí sola, en particular si la depresión reviste carácter grave.)

La mejora de los tratamientos importa mucho. Aunque los antidepresivos ejercen ahora menos efectos secundarios que antes y resultan de notable ayuda en muchos casos, la depresión sigue causando grandes sufrimientos, pérdida de vidas y decaimiento general.

Se halla muy extendida. Entre el 5 y el 12 por ciento de los hombres y el 10 y el 12 por ciento de las mujeres de los países industrializados sufrirán algún episodio depresivo importante en su vida. En torno a la mitad de ellos sufrirán depresiones en más de una ocasión, y hasta un 10 por ciento (alrededor del 1,0 al 1,5 por ciento de la población de esos países) experimentarán fases maníacas además de las depresivas, lo que se conoce como enfermedad maniacodepresiva o alteración bipolar. Con la manía se pierden las ganas de dormir y llegan los delirios de grandeza, la hiperactividad y una propensión a adoptar comportamientos autodestructivos: promiscuidad sexual, gastos incontrolados o conducción temeraria.

Además del dolor y la incapacitación que acarrea, la depresión representa también un peligro para la propia vida. Cada año se suicida un 15 por ciento de las personas que sufren depresión o enfermedad bipolar. En 1996, según datos del Centro Norteamericano para el Control y Prevención de las Enfermedades, el suicidio aparecía en ese país en el noveno lugar entre las causas de muerte (ligeramente por detrás del sida), lo que representó un total de 30.862 personas. Pero se supone que el número real es superior. El suicidio de muchas personas puede atribuirse a otros motivos al objeto de que las familias reciban la prima del seguro o eviten la vergüenza. Por no hablar de una fracción significativa de los accidentes de circulación.

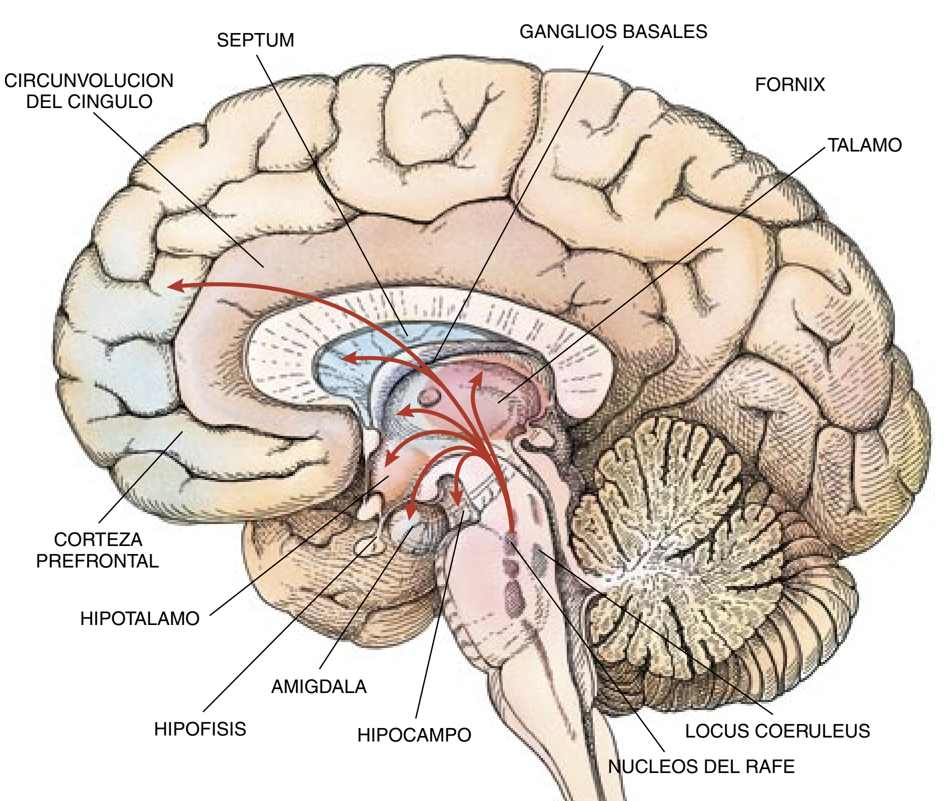
Todo ello ocasiona gastos enormes. Ciñéndonos a los Estados Unidos, el monto de 1992 se elevó a un total de 43.000 millones de dólares, asociados en su mayor parte a una pérdida o merma de rendimiento. Se acumulan las pruebas del incremento del riesgo de infarto y de accidente cerebrovascular por culpa de una depresión severa. No es rara la merma en tiempo y calidad de vida que sufren quienes, además, padecen cáncer.

Debemos a los expertos en genética algunas de las pruebas más antiguas sobre la existencia de un componente biológico en la depresión de muchos pacientes. La depresión y la depresión maníaca aparecen con frecuencia en el círculo familiar. Hay probabilidad de que los parientes cercanos (hijos, hermanos y padres) de los afectados por la enfermedad depresiva o bipolar en sus formas graves padezcan la misma enfermedad, u otras afines, con una frecuencia mucho mayor que el resto de la población. Los estudios con gemelos idénticos (genéticamente indistinguibles) y no idénticos (cuyos genes no presentan un parecido mayor que el existente en un par de hermanos nacidos en partos distintos) respaldan la tesis del componente hereditario. La presencia de depresión maníaca en ambos hermanos menudea más en gemelos idénticos que en no idénticos, y su frecuencia se eleva cuando sólo hay depresión.

A lo largo de los últimos 20 años se ha empeñado un notable esfuerzo en la identificación de los genes involucrados. Se muestran éstos todavía algo escurridizos, quizá porque en la predisposición a la depresión sean varios los genes implicados; podría darse, además, que cada uno de ellos aportara una pequeña contribución, lo que representaría una dificultad añadida para su detección.

Los informes provisionales de cierta investigación entre la población Amish, con amplio historial maniacodepresivo, indujeron a pensar en la posibilidad de que el cromosoma 11 contuviera uno o más genes que confiriesen una vulnerabilidad para la enfermedad bipolar. Pero esa idea no ha podido substanciarse. Un gen ubicado a lo largo del cromosoma X podría desempeñar algún papel en ciertos pacientes, pero la conexión no parece tan evidente en la mayoría de los afectados por ese mal. Se ha sugerido que diversas regiones del cromosoma 18 y un sitio del cromosoma 21 podrían tener que ver con la vulnerabilidad a la enfermedad bipolar, aunque estos extremos están aún pendientes de confirmación.

Mientras la genética continúa investigando, la neuroquímica sigue su propio paso. Aquí el dominio de estudio son los neurotransmisores. Muchos casos de depresión tienen su origen, al parecer, en alteraciones de circuitos cerebrales que transmiten señales a través de monoaminas, neurotransmisores que poseen un grupo funcional amino. Pese a abarcar entre sus moléculas, derivadas todas ellas de aminoácidos, la serotonina, la noradrenalina y la dopamina, sólo se dispone de suficiente número de datos sobre la noradrenalina y la serotonina.



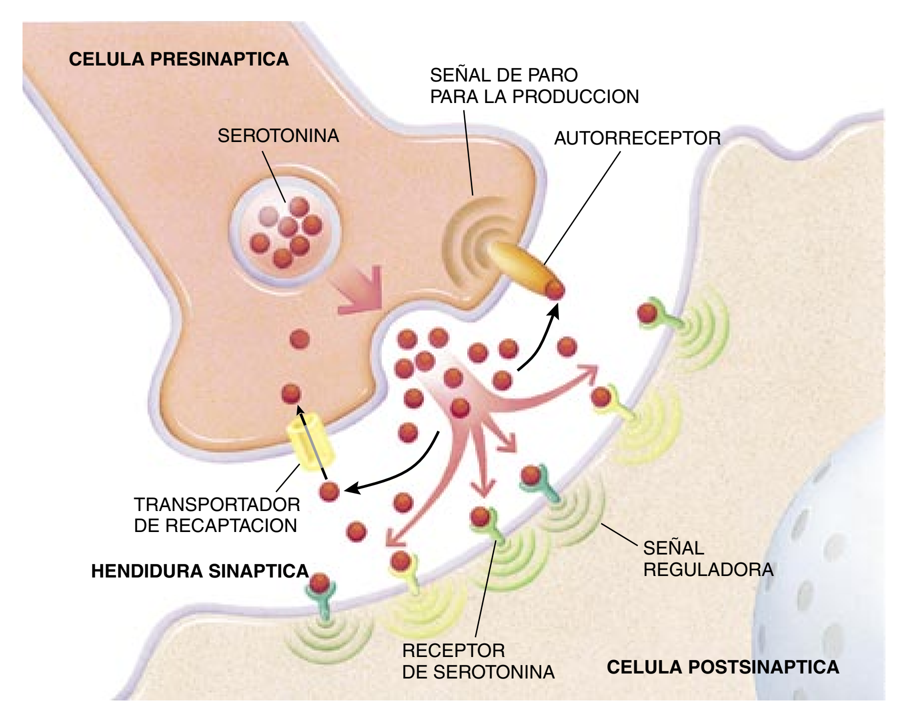
2. LAS AREAS CEREBRALES relacionadas con el estado de ánimo y otras funciones habitualmente alteradas en individuos deprimidos —tales como el sueño, libido y memoria— aparecen resaltadas. Con la excepción de la hipófisis, se integran en el sistema límbico; todas reciben señales de neuronas que segregan serotonina, noradrenalina o ambas. Una caída de actividad en los circuitos que utilizan serotonina o noradrenalina favorece la depresión. Se indican algunas de las vías de la serotonina (*flechas*). Las células productoras de noradrenalina se proyectan desde el locus coeruleus.

Las monoaminas se relacionaron con la depresión en los años cincuenta. Descubrióse entonces que un 15 por ciento de los pacientes hipertensos a los que se recetaba reserpina mostraban una depresión severa. Coincidió con que el fármaco provocaba una caída de monoaminas. Casi simultáneamente, se observó que otro fármaco indicado para el tratamiento de la tuberculosis levantaba el ánimo de pacientes deprimidos. La investigación reveló que este agente inhibía la degradación neuronal de las monoaminas por la enzima monoaminooxidasa; se supuso que el fármaco aliviaba la depresión al bloquear la degradación de las monoaminas, que permanecerían activas en los circuitos cerebrales. Consideradas en su globalidad, de tales observaciones se desprendía que la caída del nivel de monoaminas en el cerebro podría originar una depresión. Surcando en esa línea, se desarrollaron inhibidores de monoaminooxidasas, que se convertirían en la primera clase de fármacos antidepresivos.

De entre las distintas monoaminas, ¿cuáles son las principales en la depresión? En los años sesenta Joseph J. Schildkraut, de la Universidad de Harvard, apostó por la noradrenalina en la hipótesis de las "catecolaminas" en las alteraciones del estado de ánimo. Propuso que la depresión nacía de una carencia de noradrenalina (que es también una catecolamina) en determinados circuitos cerebrales, mientras que el estado maníaco tenía que ver con un exceso de esa substancia. La teoría se ha ido refinando con el tiempo. Se admite que un aumento o un descenso de noradrenalina no llevan aparejados en todos los individuos un cambio en el estado de ánimo. Sin embargo, el nexo propuesto, depleción de noradrenalina y depresión, ha recibido ya abundante apoyo experimental. Estos circuitos, que arrancan del troncoencéfalo, en particular del locus coeruleus, se proyectan en el sistema límbico: un grupo de zonas corticales y subcorticales que desempeñan una función significativa en la regulación de las emociones.

Para entender las pruebas que vinculan la noradrenalina con otras monoaminas, conviene saber cómo funcionan dichos neurotransmisores. La zona de contacto entre dos neuronas se denomina sinapsis. Las monoaminas, igual que el resto de los neurotransmisores, pasan de una neurona (la célula presináptica) a otra (célula postsináptica) a través de una pequeña hendidura (hendidura postsináptica). Este tipo de conexión provoca una serie de cambios intracelulares que estimulan o inhiben el disparo de la célula postsináptica. El efecto de los neurotransmisores depende en gran parte de la naturaleza y de la concentración de sus receptores en la célula postsináptica. Los receptores de serotonina, por ejemplo, aparecen bajo la forma de 13 o más subtipos que pueden variar en la sensibilidad a la serotonina y en los efectos que producen.

La intensidad de la señal depende, asimismo, de la cantidad de neurotransmisor liberado y del tiempo que permanece en la hendidura sináptica. Ambas condiciones se hallan relacionadas al menos con dos tipos de moléculas que se encuentran en la superficie de la célula que las libera y que corresponden a los llamados autorreceptores y transportadores. Cuando un autorreceptor se une a moléculas de un neurotransmisor en la sinapsis, los receptores indican a la célula que modere su frecuencia de disparos y, por ende, su liberación de transmisor. Los transportadores bombean físicamente moléculas de neurotransmisores desde la hendidura sináptica a la célula presináptica, un proceso que recibe el nombre de recaptación. La monoaminooxidasa del interior de las células afecta también a los niveles de neurotransmisores, mediante la degradación de monoaminas, reduciendo de este modo el



3. LA SEROTONINA (*esferas rojas*) segregada por una célula presináptica se une a receptores (*matices de verde*) sobre una célula postsináptica; insta la excitación de ésta o su inactivación. La respuesta de la célula viene condicionada por la concentración de serotonina en la hendidura y por los tipos de receptores, que los hay al menos en número de 13. Los niveles de serotonina en las sinapsis caen en presencia de dos tipos de moléculas presinápticas: los autorreceptores (*naranja*)y los transportadores de recapturación (*amarillo*). Los autorreceptores ordenan la suspensión de la producción celular de serotonina; los transportadores absorben el neurotransmisor. Varios antidepresivos, incluidos el Prozac y el Paxil, aumentan la concentración de serotonina en la sinapsis al inhibir la recapturación.

número de moléculas disponibles para su liberación.

Entre los hallazgos que relacionan bajos niveles de noradrenalina en la sinapsis con la depresión hay un dato que se repite: los marcadores indirectos de niveles de noradrenalina en el cerebro —niveles de sus metabolitos o productos secundarios en material más accesible (líquido cerebroespinal, orina)— suelen ser bajos en los individuos deprimidos. En los estudios postmortem se pone de manifiesto un aumento de la densidad de receptores de la noradrenalina en la corteza de suicidas por depresión.

Quienes no estén familiarizados con la aparición de receptores en la superficie celular podrían atribuir ese incremento de receptores a un contacto mayor entre noradrenalina y sus receptores y a una transmisión de señales más intensa. Pero ese incremento del número de receptores en respuesta reguladora es lo que cabría esperar si las concentraciones de noradrenalina en las sinapsis fueran anormalmente bajas. Cuando la concentración de transmisores decae en las sinapsis, las células postsinápticas multiplican el número de receptores en un intento compensador de captar cualquier señal emitida.

Un descubrimiento reciente en pro de la hipótesis de la noradrenalina lo tenemos en los nuevos fármacos que bloquean selectivamente la recaptación de noradrenalina; de ese modo elevan el nivel de noradrenalina en las sinapsis. Son antidepresivos eficaces en muchos individuos. La reboxetina es un antidepresivo que se vende ya en algunos países.

Las pruebas que relacionan la noradrenalina con la depresión son sólidas y aumentan por días. Ello no obsta para que la serotonina se haya convertido en la molécula de moda gracias al éxito terapéutico del Prozac y a los antidepresivos afines que modifican los niveles de serotonina. Pero la investigación sobre el papel de la serotonina en los trastornos anímicos se remonta 30 años atrás, cuando los grupos encabezados por Arthur J. Prange, Jr. y Alec Coppen propusieron la hipótesis permisiva. De acuerdo con la misma, la depleción sináptica de serotonina constituía un agente causal de la depresión, que operaba mediante el fomento o la permisión de la caída en los niveles de noradrenalina.

Un fallo en los circuitos que utilizan serotonina podría en efecto amortiguar la señal de la noradrenalina. Las neuronas productoras de serotonina se proyectan desde los núcleos del rafe, en el troncoencéfalo, hacia neuronas de diversas regiones del sistema nervioso central, incluidas las que segregan noradrenalina o controlan su liberación. La depleción de serotonina podría promover la depresión al afectar también a otros tipos de neuronas. Las células productoras de serotonina se extienden hacia muchas regiones del cerebro que intervienen, así se cree, en la sintomatología depresiva: la amígdala (zona implicada en las emociones), el hipotálamo (involucrado en el apetito, la libido y el sueño) y áreas corticales que participan en la cognición y otros procesos superiores.

Entre las pruebas de la relación entre bajo nivel de serotonina y depresión recordaremos la obtenida en el líquido raquídeo de pacientes deprimidos y, especialmente, de suicidas; ese fluido contiene cantidades reducidas de uno de los principales productos de la degradación de la serotonina, señal de que los niveles de serotonina son bajos también en el cerebro. Además, los niveles de una molécula de superficie, clave para las células liberadoras de serotonina en el cerebro, son inferiores en los pacientes deprimidos que en los sujetos sanos, lo que implica que ha mermado también el número de células serotonérgicas. Más aún, la densidad de al menos una de las formas del receptor de serotonina —el tipo 2— es mayor en el tejido cerebral obtenido en la necropsia de pacientes deprimidos. Igual que sucedía en los receptores de noradrenalina, esa elevación reguladora evoca una suerte de compensación ante la caída de serotonina en la hendidura sináptica.

Agréguese a lo anterior la notable eficacia terapéutica mostrada por fármacos bloqueantes de transportadores presinápticos, para impedir la recaptación de serotonina de la hendidura sináptica. A finales de los años cincuenta, y aunque entonces se desconocía su mecanismo de acción, los antidepresivos tricíclicos (que deben su nombre a la presencia de tres anillos en su molécula) pasaron a engrosar los inhibidores de la monoaminooxidasa en los estantes

de las farmacias. Andando el tiempo se observó su múltiple acción en el cerebro; entre otras cosas, frenaba la recaptación de serotonina con la consiguiente elevación de los niveles de serotonina en las sinapsis.

Los investigadores veían en el segundo efecto la razón de su acción antidepresiva. No se pudo confirmar hasta la introducción del Prozac y de otros fármacos (Paxil, Zoloft y Luvox), capaces de bloquear a los transportadores responsables de la recaptación de la serotonina sin afectar otras monoaminas del cerebro. Estos inhibidores selectivos de la recaptación de serotonina (SSRI) han terminado por revolucionar el tratamiento de la depresión, merced a su eficacia y levedad de sus efectos secundarios. Effexor y otros antidepresivos de última generación bloquean la recaptación de la serotonina y de la noradrenalina.

La investigación sobre la serotonina ha aportado nuevos criterios para desentrañar la susceptibilidad al infarto y a los accidentes cerebrales que evidencian los deprimidos. La activación y acumulación de plaquetas promueven la formación de trombos que obstruyen los vasos e impiden el flujo sanguíneo hacia el corazón y el cerebro, con el daño consiguiente para ambos órganos. Por lo observado en varios trabajos de laboratorio, el nuestro incluido, las plaquetas de enfermos deprimidos se muestran muy sensibles a las señales de activación, sin excluir las emitidas por la serotonina, que intensifica la reactividad plaquetaria ante otros estímulos químicos más potentes. Además, las plaquetas de los enfermos deprimidos presentan un número menor de transportadores responsables de la recaptación de la serotonina. Comparadas con las plaquetas de los individuos sanos, las de los pacientes deprimidos podrían hallarse menos capacitadas para absorber la serotonina de su entorno y frenar la exposición a las señales de activación plaquetaria.

El mal funcionamiento de los circuitos de serotonina, de noradrenalina o de ambos favorece la depresión en muchos individuos. Para otras investigaciones, no menos rigurosas, la depresión revela la desregulación de circuitos cerebrales encargados de controlar las actividades de ciertas hormonas. Desde hace tiempo se conocen desarreglos hormonales en los pacientes deprimidos.

El hipotálamo ocupa un lugar preeminente en la jerarquía de los sistemas reguladores de la secreción hormonal. Sintetiza y libera péptidos (pequeñas cadenas de aminoácidos) que actúan sobre la hipófisis, en la base del cerebro, estimulando o inhibiendo la liberación hipofisaria de diversas hormonas a la sangre. Estas —hormona del crecimiento, hormona estimuladora del tiroides y hormona adrenocorticotropa (ACTH)— controlan la secreción de otras hormonas de sus glándulas diana. Además de funcionar fuera del sistema nervioso, las hormonas liberadas en respuesta a las hipofisarias ejercen también una función de retroinhibición sobre la hipófisis y el hipotálamo. Allí liberan señales inhibidoras que evitan una síntesis derrochadora.

Efectos de la aplicación de CRF al cerebro en los animales

DISMINUCION	AUMENTO
Apetito	Actividad desbordante en el entorno familiar
Sueño	Inhibición en un entorno no familiar
Actividad reproductora	

4. SISTEMA HORMONAL llamado eje hipotálamo-hipófisis-adrenal. Se activa (*flechas ininterrumpidas en el diagrama*) en respuesta al estrés. De acuerdo con datos cada vez más abundantes, la hiperactividad crónica del eje, y sobre todo la producción exagerada del factor liberador de corticotropina (CRF), favorece la depresión. Se ha comprobado que la inoculación de CRF en el cerebro de los animales de laboratorio produce síntomas (*arriba*) semejantes a los que se presentan en los individuos deprimidos.

En numerosas ocasiones se ha comprobado que los pacientes deprimidos presentan una respuesta torpe ante diversas substancias que estimulan la liberación de la hormona del crecimiento. También reaccionan de forma aberrante ante la substancia hipotalámica que induce la secreción de la hormona estimuladora del tiroides por la hipófisis. Además, una causa común de la falta de respuesta a los antidepresivos es una insuficiencia tiroidea anterior no diagnosticada.

Se trata de una serie de descubrimientos harto sorprendentes. Con todo, los datos más sólidos apuntan hacia la alteración del eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA), que es el sistema que organiza la respuesta ante el estrés. Cuando se detecta una amenaza contra el bienestar físico o psíquico, el hipotálamo intensifica la síntesis del factor liberador de corticotropina (CRF), que induce la secreción hipofisaria de ACTH. Esta molécula indica que la glándula adrenal libere cortisol. La suma de esos cambios prepara al organismo para la lucha o para la huida; interrumpe, pues, las actividades que distraigan de cuanto no se ordene a la autoprotección. Así, el cortisol refuerza la distribución de combustible para los músculos; el CRF apaga la sensación de hambre y el apetito sexual y eleva el estado de alerta. Una activación crónica del eje HHA, sin embargo, podría sentar las bases de la enfermedad y, según parece, de la depresión.

A finales de los años sesenta y comienzos de los setenta, se advirtió la existencia de una mayor actividad del eje HHA en pacientes deprimidos no sometidos a medicación, reflejado por el aumento de los niveles de cortisol en la orina, sangre y líquido cefalorraquídeo, así como por otros indicadores. Un aluvión de trabajos posteriores confirmarían que muchos

pacientes deprimidos —sobre todo los más graves — presentan una hiperactividad del eje HHA. Observación reiterada una y otra vez en investigación psiquiátrica.

En estudios más pormenorizados del fenómeno se han encontrado alteraciones en cada nivel del eje HHA de pacientes deprimidos. Lo mismo la glándula adrenal que la hipófisis han aumentado su tamaño; aquélla, además, segrega abundante cortisol. Pero mi grupo de trabajo y otros atribuyen a las alteraciones en las neuronas productoras de CRF la hiperactividad del eje HHA y la instauración de los síntomas depresivos.

De forma muy señalada se evidencia en los deprimidos unas concentraciones de CRF en el líquido cefalorraquídeo más altas que en sujetos normales o pacientes de otras afecciones psiquiátricas. El incremento de los niveles de CRF mengua con el tratamiento mediante antidepresivos y mediante una terapia electroconvulsiva eficaz. Más aún, el examen del tejido cerebral procedente de necropsias revela un aumento del número de neuronas productoras de CRF en el hipotálamo y una mayor expresión del gen del CRF (lo que resulta en una síntesis elevada de CRF) en los pacientes deprimidos. Además, la aportación de CRF al cerebro de animales de laboratorio insta un comportamiento arquetípico del deprimido: insomnio, falta de apetito, descenso de la libido y ansiedad.

Los neurólogos no saben cómo ensamblar las contribuciones de la genética y de la bioquímica de monoaminas y hormonas, si es que van siempre de la mano. Con los datos disponibles, sí podemos esbozar un cuadro parcial: los individuos de infancia traumática serán los deprimidos de mañana. A esta hipótesis la llamo modelo diátesis-estrés de las alteraciones del ánimo, para dar fe de la interacción entre experiencia (estrés) y predisposición innata (diátesis).

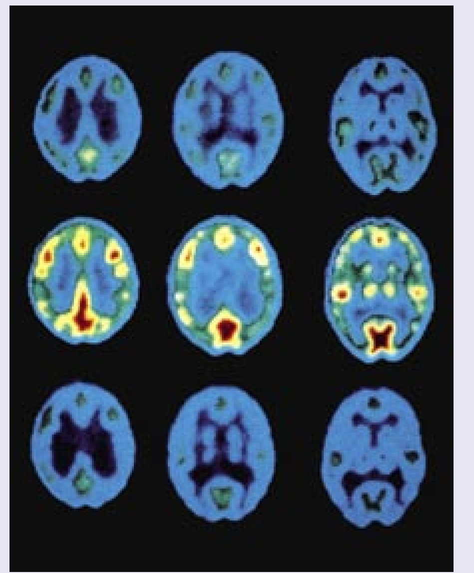
La observación del carácter familiar de la depresión denota que ciertos rasgos genéticos de las familias interesadas facilitan la depresión. Según cabe suponer, los condicionamientos genéticos rebajan directa o indirectamente los niveles de monoaminas en las sinapsis o incrementan la reactividad del eje HHA ante el estrés. El umbral genético no tiene por qué ser tan bajo que promueva la depresión si no media un estrés serio; pero muy bien podría situarse en un nivel mucho más bajo de haberse vivido experiencias negativas desde muy pronto.

Depresión y nuevas técnicas de formación de imágenes

Gracias a los avances registrados a lo largo de los últimos 15 años en la formación de imágenes podemos ver lo que acontece en el interior cerebral y completar así otros enfoques seguidos en la identificación de las anomalías neurobiológicas que están en la base de la depresión. Estas técnicas permiten descubrir la presencia de marcadores de susceptibilidad anatómicos o funcionales.

Con la técnica de formación de imágenes mediante resonancia magnética se han logrado hallazgos sorprendentes, aunque sus implicaciones prácticas no estén siempre claras. Las imágenes de la substancia blanca subcortical en los pacientes maniacodepresivos (con la enfermedad bipolar), sobre todo en personas de edad, revelan un número altísimo de manchas brillantes en regiones cerebrales que se sabe relacionadas con el estado de ánimo (ganglios basales, tálamo y troncoencéfalo). Las “hiperintensidades” revelan a menudo una pérdida neuronal, aunque seguimos a oscuras sobre los tipos de neuronas que faltan allí.

El volumen de diversas estructuras cerebrales aparece también menguado en pacientes que sufren un largo período de la depresión. Recordaremos el hipocampo, parte del sistema límbico (un conjunto de estructuras implicadas en la emoción y en la memoria). Por ejemplo, en un estudio de mujeres adultas cuya depresión se encontraba en remisión, el hipocampo era menor que en otras mujeres de la misma edad. La observación guarda coherencia con lo visto en animales, donde una secreción excesiva de cortisol (lo que ocurre en muchos individuos deprimidos) elimina células del hipocampo. Ignoramos si la pérdida neuronal en el hipocampo y otras regiones favorece la depresión, pero es razonable suponer que entre las neuronas afectadas podrían contarse las que responden a la serotonina o a la noradrenalina. La caída



CORTES DE UN BARRIDO CON PET del cerebro de un paciente que pasaba cíclicamente de la depresión (*hilera superior*) a la euforia (*hilera del medio*) y de nuevo (*hilera de abajo*) al estado depresivo. Dichos cortes revelan diferentes patrones de actividad en los dos estados. Los niveles de actividad se indican por una gama de colores que va del azul (*bajo*) al amarillo y el rojo (*alto*), pasando por el verde.

Para nosotros, los malos tratos, los abusos y el abandono infantil no sólo activan la respuesta ante el estrés, sino que inducen además una hiperactividad de las neuronas portadoras de CRF; éstas responden ante el estrés y se sobreexcitan en los deprimidos. Si la hiperactividad neuronal del niño persiste en el adulto, estas células hipersensibles reaccionarían enérgicamente incluso ante una situación de moderado estrés. Este efecto, al producirse en personas predispuestas por su propia naturaleza para la depresión, podría desencadenar respuestas neuroendocrinas y de comportamiento características del trastorno que nos ocupa.

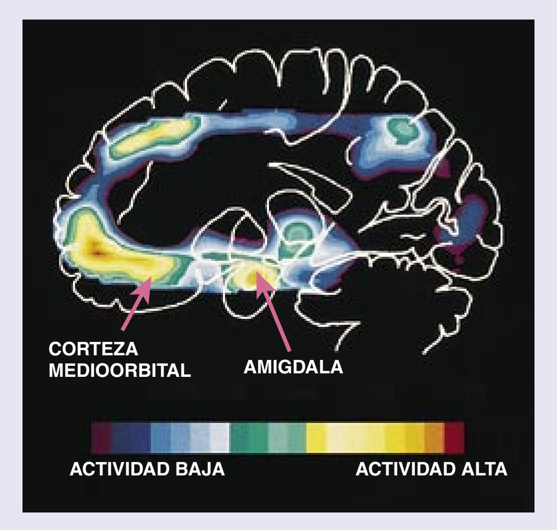
Para someter a prueba la hipótesis diátesis-estrés, realizamos una serie de experimentos en los que se privaron de ciertas atenciones a ratas recién nacidas. Las separamos de sus madres durante breves períodos entre los día 10 y 21 de vida, antes de permitir que viviesen, una vez terminada la lactancia, dentro de una colonia de ratas control. Al llegar a la edad adulta, las ratas privadas de cuidados mostraron claros signos de cambios en las neuronas portadoras de CRF, todos ellos en la dirección observada en los pacientes deprimidos: incremento en la secreción de ACTH inducida por estrés y elevación de las concentraciones de CRF en diversas áreas del cerebro. Eran altos también los niveles de corticosterona (el cortisol de la rata). De esas observaciones se desprendía que en las ratas privadas del cuidado materno había incrementado la expresión del gen CRF con la consiguiente elevación de la pro-

de estas moléculas indicadoras, o neurotransmisores, interviene en la aparición de la depresión en muchos casos.

Los estudios fundados en las técnicas de formación de imágenes que exploran la función cerebral —especialmente en zonas activas (excitadas) mientras el sujeto está en reposo u ocupado en alguna tarea— han aportado nuevos puntos de vista. La tomografía de emisión de positrones (PET) aplicada a sujetos deprimidos, por ejemplo, nos pone de manifiesto la existencia de patrones de actividad peculiares en varias áreas límbicas y corticales del cerebro. En cierto paciente que sufría cambios cíclicos cortos entre depresión y manía en el curso de pocos días, el patrón de activación global variaba drásticamente de un estado a otro. El trabajo en cuestión aportaba claves valiosas sobre las zonas que intervenían predominantemente en uno u otro estado. El análisis tomográfico da a entender que la intensificación de actividad en una región del sistema límbico —la amígdala del hemisferio izquierdo— podría ser un indicador de una notable vulnerabilidad a la depresión en el futuro.

Con la técnica de formación de imágenes funcionales se nos revelan las concentraciones de las moléculas diana correspondientes a los neurotransmisores; podemos, pues, compararlas con las de otros sujetos en diversas zonas cerebrales. Se están preparando moléculas marcadoras que se unirán al transportador de recaptación de serotonínica (que elimina serotonina de las sinapsis) o que se enlazarán con algún tipo de receptor de serotonina; con su ensayo, se espera obtener una información valiosa sobre las zonas del cerebro que presentan una caída de actividad serotonínica en los enfermos deprimidos. Gracias a las imágenes funcionales podremos resolver dónde ejercen sus efectos los distintos antidepresivos.

La batería de nuevas técnicas de formación de imágenes se está poniendo al servicio del estudio de la depresión, sus causas y su tratamiento. Lo que nos revelen habrá de revolucionar cuanto se sabe acerca de las enfermedades que afectan al estado de ánimo. Abrirá asimismo una nueva puerta a la esperanza de encontrar también mejores tratamientos. *—C.B.N.*



HIPERACTIVIDAD de la corteza prefrontal y la amígdala del hemisferio izquierdo de deprimidos, observable merced a la técnica PET. Algunos de los trabajos sugieren que la intensificación de la actividad en la amígdala puede revelar una mayor vulnerabilidad a caer en depresión.

ducción de CRF, un efecto ahora confirmado por Paul M. Plotsky, colaborador mío en la Universidad de Emory.

En ciertas regiones del cerebro de las ratas privadas de cuidado materno hemos percibido una mayor densidad de receptores de CRF. El incremento de receptores suele reflejar la búsqueda de una compensación ante el descenso de la substancia que actúa sobre el receptor. En este caso, sin embargo, la mayor densidad del receptor no contrapesaba un descenso de CRF, sino que acontecía a pesar del aumento de éste, vale decir, la peor de todas las posibilidades. Una concentración permanentemente alta de un receptor tendería a potenciar la acción del CRF, redoblando, en consecuencia y de forma permanente, los efectos inductores de depresión ejercidos por el CRF y el estrés.

Plotsky ha dado con un descubrimiento inicial de enorme interés. Ha observado que el tratamiento con Paxil, inhibidor selectivo de la recaptación de serotonina, devolvía la concentración de CRF a sus niveles de normalidad, compensaba cualquier incremento en el número o sensibilidad de los receptores (reflejada en la producción normal de corticosterona por el componente inferior del eje) y equilibraba el comportamiento (las ratas se tornaban menos asustadizas).

Ignoramos la razón por la que la recaptación de serotonina habría de normalizar el eje HHA. Lo que no obsta para que reconozcamos que, en virtud de esa observación, la recaptación de serotonina adquiere sumo interés en los deprimidos con una infancia traumática. Plotsky añade que todas las anomalías del eje HHA y de los niveles de CRF reaparecen al interrumpirse el tratamiento, algo que sugiere, por analogía, que la terapia medicamentosa debe continuarse para evitar recidivas.

Los estudios de Bonnet con macacos, que en cuanto primates se asemejan más al hombre, dieron resultados parecidos. Durante los tres primeros meses, los recién nacidos y sus madres quedaban expuestos a tres condiciones de forrajeo: una de abundancia, otra de escasez y una tercera variable. La situación variable (en la que había alimento, aunque sin posibilidad de predicción) causaba bastante ansiedad en las madres, que llegaban hasta el extremo de despreocuparse por completo de la cría. En corroboración de lo previsto por nuestro modelo, los recién nacidos se mostraban menos activos en la condición de forrajeo variable, evitaban entonces cualquier interacción con los otros monos y persistían paralizados ante situaciones nuevas. Llegados al estado adulto mostraban también una concentración alta de CRF en el líquido cefalorraquídeo.

Los datos obtenidos con ratas y monos plantean cuestiones profundas en el campo de la clínica y de la política sanitaria. Sólo en los Estados Unidos de América se denunciaron en 1995 más de tres millones de casos de malos tratos a niños; en un millón de los casos, por lo menos, se demostró la veracidad de la denuncia. Si los efectos operados en el hombre se parecen a los establecidos en animales, hemos de admitir que los malos tratos o el abandono instan cambios permanentes en el cerebro en desarrollo, cambios que potencian la producción de CRF y la respuesta ante este factor, con lo que aumenta la vulnerabilidad a la depresión a lo largo de la vida entera.

Si esa conclusión es correcta, nos hallaremos ante el reto científico de identificar, mediante técnicas inocuas y capacitadas para averiguar la actividad de las neuronas productoras de CRF o el número de receptores de CRF, los individuos maltratados en peligro de sufrir depresión. Hemos de determinar, asimismo, si los antidepresivos, la psicoterapia y otros medios ayudan a prevenir la depresión de los niños en grave riesgo. Queda también por establecer si los adultos deprimidos con un historial de malos tratos deben tomar antidepresivos toda

la vida y si los fármacos o la psicoterapia pueden devolver a la actividad normal las neuronas productoras de CRF en el hombre.

El modelo de diátesis-estrés no explica todos los casos de depresión. No todo el que padece una depresión tuvo necesariamente una infancia de abandono o malos tratos. Pero los individuos con una historia familiar de enfermedad y una infancia traumática presentan la mayores probabilidades. Las personas que carezcan de predisposición genética a la depresión (sin historia familiar, por tanto) podrían quedar protegidos frente a una depresión grave, incluso después de una infancia dura o de experiencias traumatizantes en épocas posteriores de la vida. Y a la inversa, algunas personas que hayan heredado dicha predisposición pueden padecer una depresión, aun cuando hayan disfrutado de una infancia y vida posterior libre de traumas.

Diversos laboratorios farmacéuticos preparan agentes bloqueantes de los receptores de CRF para comprobar luego su eficacia antidepresiva. Se investiga en otra clase prometedora de fármacos que activa los receptores específicos de serotonina; este tipo de agentes se hallaría destinado a ejercer poderosos efectos antidepresivos sin estimular a los receptores de la neuronas que no intervienen en la depresión. Conforme vaya progresando el conocimiento de los mecanismos neurobiológicos más eficaz será el tratamiento indicado y más exento estará de efectos secundarios indeseables.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ROLE OF SEROTONIN IN THE PATHOPHYSIOLOGY OF DEPRESSION: FOCUS ON THE SEROTONIN TRANSPORTER. Michael J. Owens y Charles B. Nemeroff en *Clinical Chemistry*, vol. 40, n.º 2, págs 288-295; febrero de 1994.

BIOLOGY OF MOOD DISORDERS. K. I. Nathan, D. L. Musselman, A. F. Schatzberg y C. B. Nemeroff en *Textbook of Psychopharmacology*. Dirigido por A. F. Schatzberg y C. B. Nemeroff. APA Press, Washington, D.C., 1995.

THE CORTICOTROPIN-RELEASING FACTOR (CRF) HYPOTHESIS OF DEPRESSION: NEW FINDINGS AND NEW DIRECTIONS. C. B. Nemeroff en *Molecular Psychiatry*, vol. 1, n.º 4, págs 336-342; septiembre de 1996.

Una nueva mirada a los cuásares

Las observaciones recientes del Telescopio Espacial Hubble podrían revelar la naturaleza y el origen de los cuásares, misteriosos generadores de energía del cosmos

Michael Disney

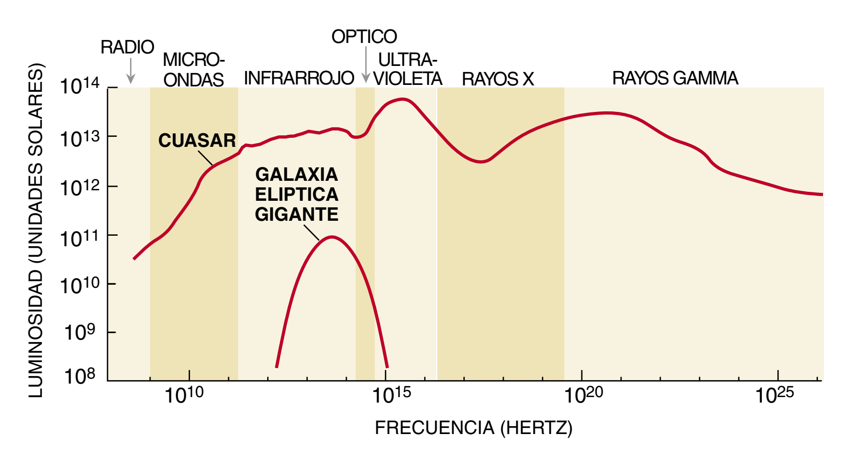
Los cuásares son los objetos más luminosos del universo. Emiten cientos de veces la radiación de una galaxia gigante, nuestra Vía Láctea por ejemplo, que brilla como diez mil millones de soles. Pero en términos astrofísicos son objetos diminutos, con un diámetro de escasos días luz, en comparación con las decenas de miles de años luz que posee el de una galaxia típica. ¿Cómo pueden los cuásares generar tanta energía con semejante volumen? ¿En qué consisten? ¿Obedecen las leyes de la física? En busca de una respuesta, los astrónomos apuntan sus instrumentos más potentes —en particular el Telescopio Espacial Hubble— hacia esas “superestrellas” celestes.

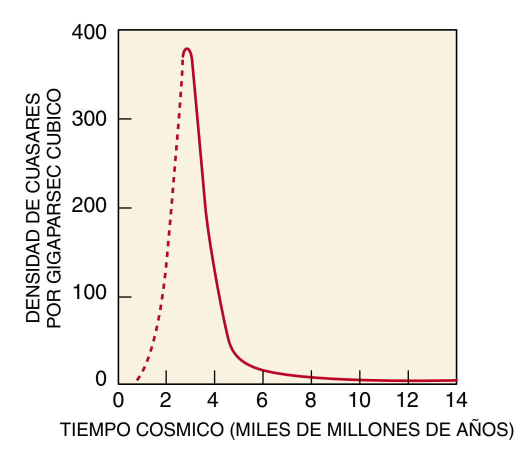
El primer cuásar se descubrió en 1962. Cyril Hazard, un joven astrónomo de la Universidad de Sydney, se hallaba investigando una poderosa fuente de radioondas situada en la constelación de Virgo. No lograba determinar el punto exacto de la fuente porque los radiotelescopios de la época carecían de suficiente precisión; ello no le impidió caer en la cuenta de que la Luna, a su paso por Virgo, ocultaría aquel objeto desconocido. Con John Bolton, director de un radiotelescopio recién construido en Parkes, dirigieron la parabólica gigante hacia la fuente de la radioemisión y esperaron a que se produjera la ocultación lunar. Si lograban cronometrar la desaparición y reaparición de la señal, determinarían con precisión la radiofuente y la identificarían con un objeto visible del cielo. Para su desgracia, cuando salió la Luna la parabólica gigante estaba ya tan inclinada que se acercaba a su parada de seguridad. Imperturbable ante el riesgo, Bolton desactivó los topes, y el telescopio siguió la trayectoria descendente de la ocultación; al final el borde de la parabólica casi rozaba la Tierra.

Tamaño atrevimiento obtuvo su recompensa. Con los datos de las mediciones Hazard calculó la posición precisa de una fuente de radio cósmica. La identificó con un objeto del cielo nocturno denominado 3C273, brillante y con aspecto de estrella. Su posición fue enviada a Maarten Schmidt, del Observatorio de Monte Palomar, quien sacó su espectro óptico. Tras cierto desconcierto inicial, Schmidt comprendió que era el espectro del hidrógeno, aunque desplazado hacia el rojo un 16 por ciento por la expansión del universo; ello significaba que 3C273



1. LAS COLISIONES ENTRE GALAXIAS pueden originar un cuásar. Un agujero negro de gran masa situado en el núcleo de una de las galaxias absorbe las estrellas y el gas de la otra; el enorme torbellino de materia que cae en su interior genera un haz de radiación muy intensa. Este proceso puede estar desarrollándose en el cuásar PG 1012+008 (foto pequeña), como observa el Telescopio Espacial Hubble. El cuásar dista de la Tierra 1600 millones de años luz.





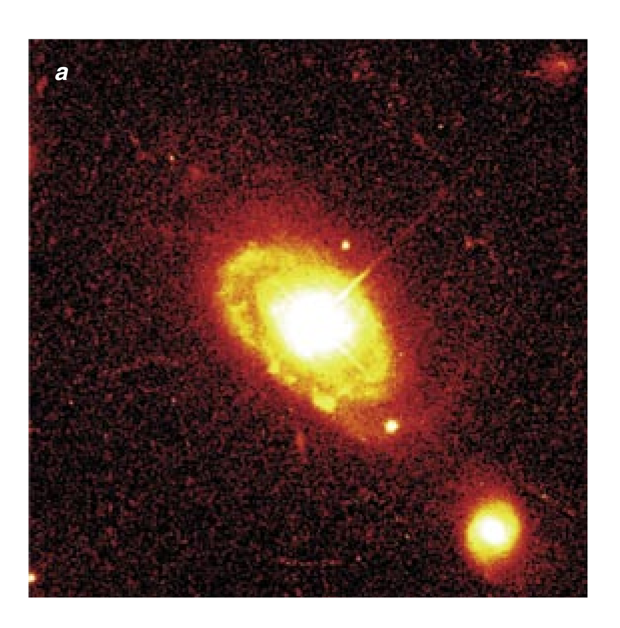
2. ESPECTRO DEL CUASAR 3C273, uno de los más brillantes y el primero en ser descubierto; es mucho más amplio que el de una galaxia elíptica gigante normal (*izquierda*). En el visible, el cuásar es cientos de veces más luminoso. Los cuásares abundaban cuando el universo tenía entre dos y cuatro mil millones de años de edad (*derecha*). En la actualidad son un millar de veces menos comunes. Tampoco menudeaban al principio del universo.

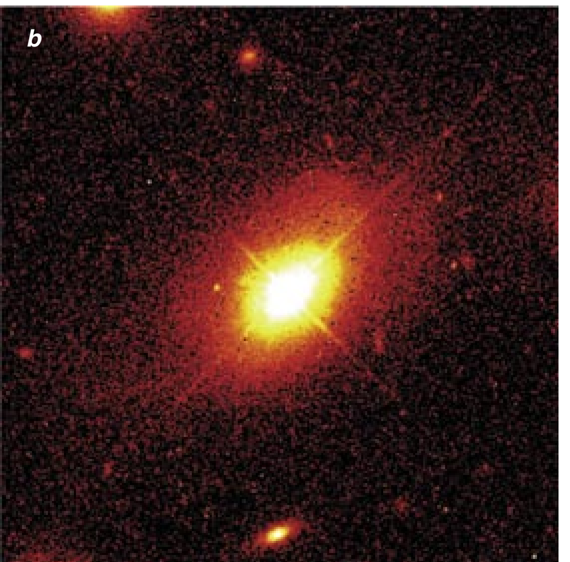
se encontraba a dos mil millones de años luz de la Tierra. Dados esa distancia y ese brillo, Schmidt calculó que debía estar emitiendo luz en cuantía cientos de veces superior a la de cualquier galaxia. Se había descubierto la primera radiofuente casi estelar, o cuásar.

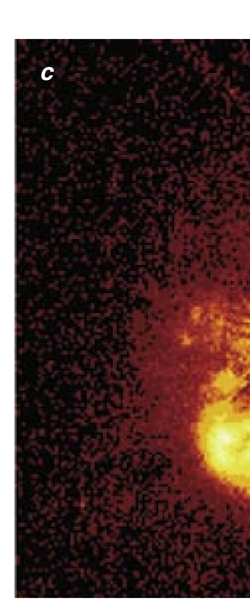
Estimulados por el trabajo de Hazard y Schmidt, los astrónomos identificaron numerosos cuásares en los años siguientes. Descubrieron que el brillo de muchos de estos objetos variaba de un modo inimaginable; algunos lo decuplican en unos días sólo. Puesto que no existe nada que pueda encenderse y apagarse en un tiempo inferior al que invierta la luz en cruzarlo, la impresionante consecuencia era que esos objetos luminosísimos habían de tener un diámetro de sólo una semana luz. Algunos astrónomos se negaron a aceptar la enormidad de las distancias y las luminosidades que indicaban los corrimientos al rojo. La controversia llegó a la prensa y atrajo a una generación joven, a mí incluido, hacia la astronomía.

Desde entonces se han catalogado miles de cuásares, algunos con corrimientos al rojo de hasta un 500 por ciento. No cuesta mucho dar con ellos. A diferencia de las estrellas y de las galaxias compuestas de estrellas, emiten radiación en una amplia gama de energías, desde los rayos gamma a las emisiones en radio. Paradójicamente, éstas, que llevaron a su descubrimiento, son la componente menos importante de su emisión total de energía. En ese motivo se apoyan algunos para sustituir el nombre “cuásar” por las siglas QSO (“quasi-stellar object”, “objeto casi estelar”).

El estudioso de los cuásares tiene ante sí cuatro grandes campos de investigación, que podemos formular en cuestiones. Primera: ¿Qué relación guardan los cuásares con galaxias y estrellas? Segunda: ¿Durante cuánto tiempo emiten su enorme energía? En nuestro entorno cósmico inmediato —unos mil millones de años luz a la redonda— sólo hay un cuásar por cada millar de galaxias, lo que no significa que sean más insólitos que éstas; podrían abundar lo mismo pero tener una vida luminosa harto más breve. Esto nos lleva a la tercera cuestión: ¿Por qué el pasado estaba mucho más nutrido de cuásares? A un desplazamiento al rojo del 200 por ciento —a una distancia de unos 10.000 millones de años luz— el número de cuásares se multiplica







por mil. En los primeros tiempos del universo parecían ser mil veces más numerosos que hoy día. Por último, la cuestión que nos deja más perplejos: ¿Cómo generan los cuásares su prodigiosa energía?

Para ninguno de estos interrogantes hay respuesta llana. El cuásar arquetípico dista tanto de nosotros, que su imagen, incluso tomada por el mayor telescopio óptico terrestre, resulta cien millones de veces demasiado pequeña para captarse con nitidez. Desde el principio, cierta corriente de astrónomos defendió que los cuásares se alojarían en galaxias, en el propio núcleo seguramente. Reunieron pruebas para demostrar que todos los fenómenos observados en los cuásares se manifestaban, aunque de forma debilitada, en los núcleos del uno por ciento de las galaxias gigantes cercanas a la Vía Láctea. Se descubrió así un zoo entero de núcleos activos de galaxias: radiogalaxias, Seyferts, fulgurantes ("blazars"), variables violentas ópticamente, fuentes superlumínicas y otros. Pero no podían discernir si estos objetos eran diferentes tipos de núcleos galácticos o si, por el contrario, representaban el mismo fenómeno, observado desde distintos ángulos o en diferentes etapas de su desarrollo. Tampoco podían explicar con precisión qué relación había entre núcleos galácticos activos y cuásares. Para los contrarios a la vinculación de ambos tipos de objetos, la luminosidad de los núcleos activos ni siquiera se acercaba a la de los cuásares; aducían, además, que la enorme fuerza constituía su rasgo distintivo al par que misterioso.

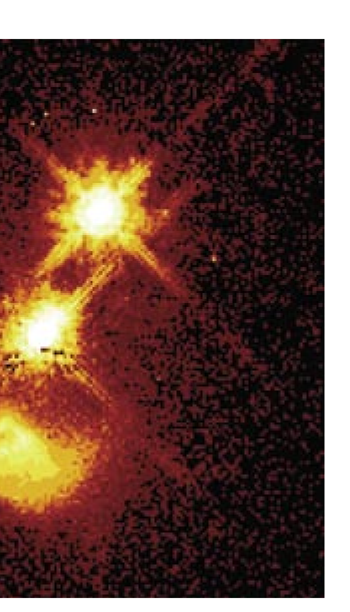
Jerry Kristian, de Monte Palomar, adoptó en 1973 un método mucho más directo. Afirmaba que, si los cuásares estaban en el interior de galaxias gigantes anfitrionas, las imágenes de los cuásares más cercanos tenían que producir un halo borroso de luz procedente de las estrellas de la galaxia anfitriona. La observación no era fácil, porque la luz del cuásar brillante, dispersada por la atmósfera terrestre, ahogaba la de la anfitriona, más débil. Pese a ello, Kristian demostró que los cuásares de menor corrimiento al rojo exhibían ese halo débil y borroso. Sus imágenes no eran del todo satisfactorias; no podía discernirse prácticamente nada de las galaxias anfitrionas, ni siquiera si se trataba de elípticas o espirales.

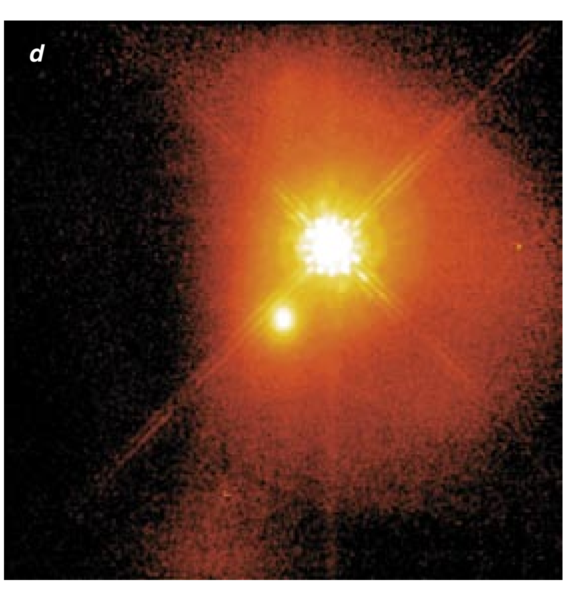
Cuando se propuso la construcción del Telescopio Espacial Hubble a mediados de los años setenta, los expertos en cuásares esperaban que el instrumento estuviera dotado para suministrar imágenes claras de las galaxias anfitrionas, si en verdad existían. Su búsqueda se convirtió en uno de los objetivos prioritarios del telescopio. Los que formamos parte del equipo europeo del telescopio espacial y diseñamos la Cámara de Objetos Débiles del Hubble pensamos en los cuásares al hacerlo. Así, incorporamos un foco de gran aumento y un coronógrafo diseñado específicamente para cancelar la brillante luz procedente de los cuásares y, con ello, incrementar la visibilidad de las anfitrionas que los alojasen.

Para entonces, los astrónomos sospechaban que un cuásar sólo podría producir tamaña energía a partir de su volumen mínimo si albergaba un ingente agujero negro en su núcleo. Tenía que tratarse de un agujero monstruoso, con un peso de mil millones de soles, que absorbiera todo el gas y las estrellas que merodeasen a su alrededor. El gas se arremolinaría hacia el agujero a prácticamente la velocidad de la luz, generando intensos campos magnéticos y enormes cantidades de radiación. Donald Lynden-Bell, del Instituto de Tecnología de California, calculó que un agujero negro vigoroso podría convertir en radiación hasta un 40 por ciento de la energía de la masa en reposo de la materia que cae en su interior. Este proceso sería 400 veces más eficaz que el de producción de energía termonuclear en las estrellas. Por tal razón, los agujeros negros masivos se convirtieron en la alternativa teórica más creíble para explicar los cuásares. (Por lo demás, todos los modelos verosímiles acabarían en agujeros negros.)

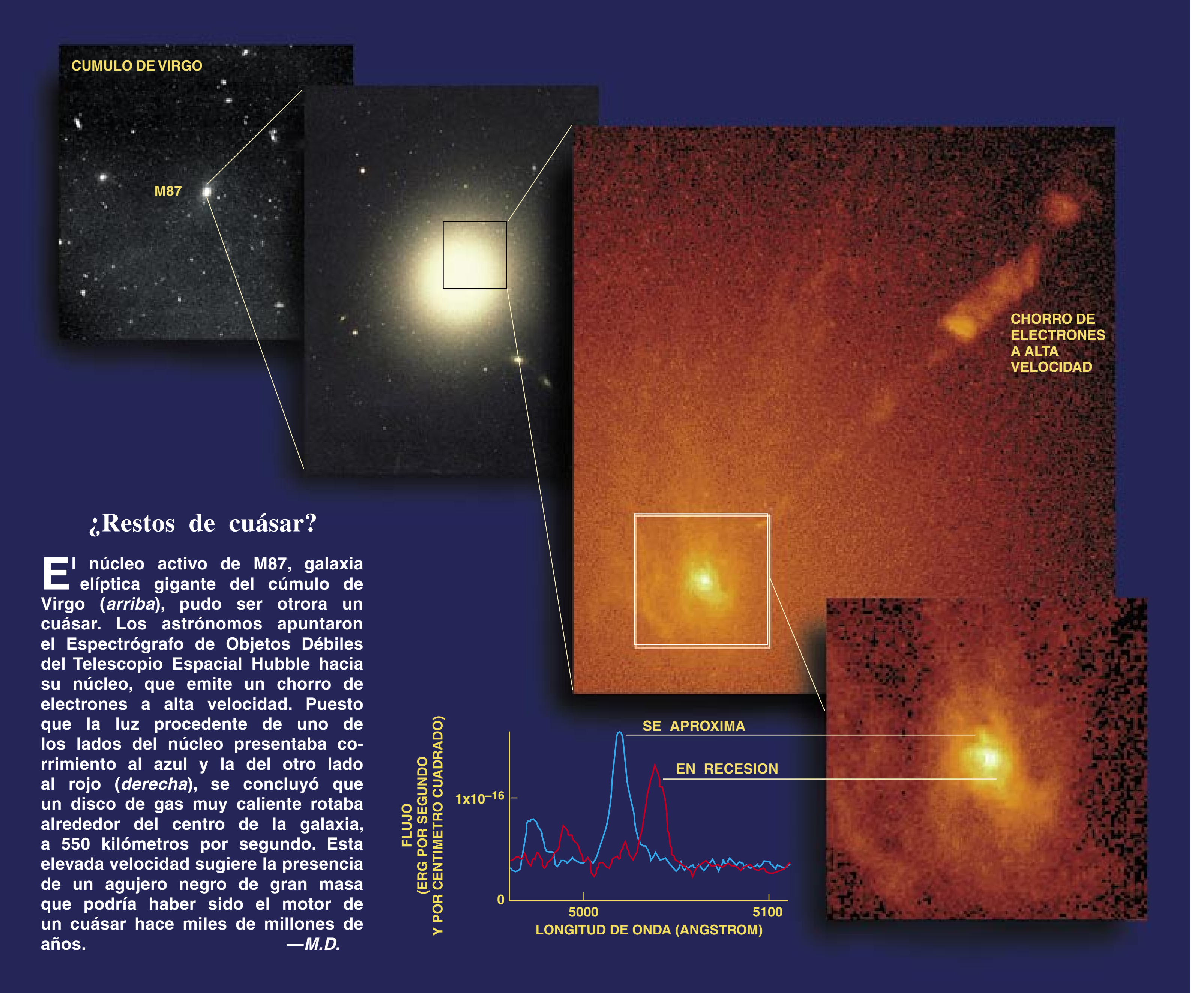
Pero, ¿cómo se alimentaban esos monstruos? Un agujero negro con semejante masa se tragaría todas las estrellas y el gas de su alrededor y se quedaría sin combustible. Para explorar este misterio, el equipo europeo del telescopio espacial construyó además un espectrógrafo especial de rendija larga y lo acopló a la Cámara de Objetos Débiles del Hubble. Este instrumento fue diseñado para medir

MICHAEL DISNEY enseña astronomía en la Universidad del País de Gales en Cardiff. Durante veinte años ha pertenecido al equipo de la Cámara de Objetos Débiles del Telescopio Espacial, encomendada a la Agencia Espacial Europea. Se doctoró por la Universidad de Londres en 1968.





3. LAS GALAXIAS ANFITRIONAS rodean a la mayoría de los cuásares observados por el Telescopio Espacial Hubble. No parece que la galaxia espiral que rodea a PG 0052+251 (*a*) y la elíptica que engloba a PHL 909 (*b*) hayan sido perturbadas por colisiones. Sin embargo, un choque galáctico parece alimentar a IRAS 04505-2958 (*c*). Bajo el cuásar hay un anillo espiral que se ha desgarrado de una de las galaxias; el objeto que vemos más arriba es una estrella en primer plano. La nueva cámara para el infrarrojo del Hubble observó otro choque galáctico (*d*). Los puntos que vemos alrededor del cuásar PG 1613+658 se deben a la difracción; la galaxia que choca está debajo del mismo y a la izquierda.



¿Restos de cuásar?

El núcleo activo de M87, galaxia elíptica gigante del cúmulo de Virgo (*arriba*), pudo ser otrora un cuásar. Los astrónomos apuntaron el Espectrógrafo de Objetos Débiles del Telescopio Espacial Hubble hacia su núcleo, que emite un chorro de electrones a alta velocidad. Puesto que la luz procedente de uno de los lados del núcleo presentaba corrimiento al azul y la del otro lado al rojo (*derecha*), se concluyó que un disco de gas muy caliente rotaba alrededor del centro de la galaxia, a 550 kilómetros por segundo. Esta elevada velocidad sugiere la presencia de un agujero negro de gran masa que podría haber sido el motor de un cuásar hace miles de millones de años. —*M.D.*

la velocidad de rotación del material en los núcleos activos galácticos y pesar, por tanto, los posibles agujeros negros de sus núcleos.

Tras el lanzamiento, varias veces pospuesto, del Hubble en 1990, se descubrió enseguida que el espejo principal del telescopio tenía un fallo de fabricación. Las imágenes eran tan burdas, que los expertos en cuásares quedaron desolados. Sentí que de cinco a diez de los más productivos años de mi carrera habían sido en balde por culpa de una incompetencia imperdonable. Y ése era el sentir de muchos. Pero en favor de la NASA hay que decir que había diseñado el Hubble de modo que pudiera ser reparado y, así, en 1993 unos astronautas le instalaron nuevas cámaras con una óptica correctora. Desgraciadamente, no pudo recuperarse ninguno de los instrumentos especiales de las cámaras originales concebidos para la observación de cuásares. Si proseguíamos con la búsqueda de galaxias anfitrionas de cuásares, tendría que ser con la nueva Cámara Planetaria de Campo Ancho, que no fue diseñada específicamente para ese trabajo. No obstante, dos equipos lo intentamos: uno europeo, dirigido por mí, y otro estadounidense, encabezado por el astrónomo John Bahcall, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton.

La observación de anfitrionas de cuásares por medio de la nueva cámara del Hubble era tan difícil como adivinar la marca de un coche que se nos aproxima de frente en medio de una tormenta de nieve y mientras nos ciegan sus faros. Había que tomar varias imágenes de cada objeto, sustraer el gran haz de luz procedente del cuásar y manipular las imágenes restantes con la ayuda de la informática. En la mayoría de los casos el resultado final era lo suficientemente detallado como para descubrir una estructura galáctica. Por desgracia, Jerry Kristian, pionero en este campo, falleció al estrellarse en California con un avión ultraligero poco antes de que se publicaran los resultados del Hubble.

¿Qué nuevas aportó el Telescopio Espacial? De los 34 cuásares observados, alrededor del 75 por ciento mostraban el halo débil y difuso que anuncia una galaxia anfitriona. En cuanto al restante 25 por ciento, es

posible que el deslumbrante haz del cuásar tape la imagen. Una mitad de las galaxias anfitrionas eran elípticas y la otra mitad espirales. Los cuásares que presentaban las señales de radio más intensas se encontraban sobre todo en las elípticas, pero no pudieron discernirse otros patrones. Y lo más apasionante: unas tres cuartas partes de las galaxias anfitrionas chocaban con otras galaxias o las engullían.

Este hallazgo ya fue publicado por John Hutchings y sus colaboradores del Observatorio Astrofísico del Dominio, en Victoria (Canadá), que observaron los cuásares con un telescopio terrestre con óptica adaptativa. Pero el Hubble, cuya resolución es mayor, facilitó pruebas mucho más gráficas de las interacciones galácticas. Las imágenes sugieren que, al chocar, las galaxias aportan el combustible necesario para la producción energética del cuásar. Las estrellas y el gas, liberados por la violencia del impacto, podrían estar precipitándose en un agujero negro de enorme masa, situado en el corazón de una de las galaxias. La materia que cae en él produce la intensa radiación.

Este proceso podría explicar el número relativo de cuásares a lo largo de las diferentes etapas de la historia del universo. Tras la gran explosión inicial no había en un comienzo galaxias, ni, por tanto, colisiones entre ellas. Y si había agujeros negros en aquel entonces, no existía mecanismo alguno que dirigiese el material hacia ellos y los convirtiera en cuásares. En consecuencia, se observan muy pocos cuásares a corrimientos al rojo muy elevados, esto es, hace más de once mil millones de años. Sin embargo, en los miles de millones de años siguientes las galaxias fueron formándose y chocando, y se produjo la cifra, alta en comparación, de cuásares que se observa a diez mil millones de años luz de la Tierra. Por último, la expansión del universo separó unas de otras a la mayoría de las galaxias y redujo así el número de colisiones galácticas y, por tanto, de cuásares.

No obstante, aproximadamente una cuarta parte de las galaxias anfitrionas observadas por el Hubble —como la galaxia espiral que rodea al cuásar PG 0052+251— no muestra indicios de colisión con otra galaxia. Es posible que haya una galaxia compañera débil en estos casos y la luz del cuásar impida su detección. Quizás exista un mecanismo alternativo que genere el combustible suficiente para transformar un agujero negro de gran masa en un cuásar. Lo que sí sabemos a ciencia cierta es que la vasta mayoría de las interacciones galácticas *no* parece producir cuásares; si lo hiciera, abundarían en número mayor que el que se desprende de las observaciones.

La escasez de cuásares parece sugerir que los grandes agujeros negros constituyen un fenómeno extraño, ausente en buena medida de las galaxias. Sin embargo, esta suposición se contradice con las pruebas recogidas por el equipo dirigido por Douglas Richstone, de la Universidad de Michigan. Combinando las observaciones del Hubble con los datos espectroscópicos procedentes de los telescopios terrestres, pesaron los núcleos de 27 de las galaxias más cercanas a la Vía Láctea. En once encontraron pruebas fehacientes de la presencia de cuerpos oscuros de gran masa, casi con total seguridad agujeros negros.

Además, algunos de esos agujeros negros dotados de gran masa podrían haber sido cuásares en alguna etapa anterior de su evolución. En 1994 un grupo de astrónomos encabezado por Holland Ford, de la Universidad Johns Hopkins, examinó con el Hubble el núcleo de M87, una galaxia elíptica gigante del cúmulo de Virgo situada a una distancia de unos 50 millones de años luz de la Tierra. El núcleo activo de M87 emite un amplio espectro de radiación, similar al que produce un cuásar, aunque mil veces menos intenso. Los astrónomos descubrieron que la luz procedente de uno de los lados del núcleo estaba desplazada al azul (prueba de que la fuente se mueve hacia la Tierra), mientras que la luz proveniente del lado opuesto presentaba un corrimiento al rojo (señal de que la fuente se aleja). Ford concluyó que observaban un disco de gas caliente en rotación. Más aún, la velocidad de rotación del disco era tan elevada, que debió de formarlo un agujero negro con el peso de tres mil millones de soles, el mismo tipo de objeto que se cree genera la energía de los cuásares. Tal vez, hace miles de millones de años, el núcleo de M87 fuera otro cuásar.

Las observaciones más recientes han llevado a los astrónomos a elaborar una teoría provisional sobre el origen de los cuásares. A tenor de la misma, las galaxias contienen en su mayoría imponentes agujeros negros, capaces de generar enormes cantidades de energía siempre que se den circunstancias especiales. La producción de energía aumenta drásticamente cuando el gas y las estrellas empiezan a caer en el interior de los agujeros negros a una velocidad mayor, cerca de una masa solar al año. Lo más frecuente —pero no siempre pasa así— es que este enorme flujo de materia ocurra en virtud de colisiones entre galaxias o cuando están muy cerca, sin llegar a fundirse. Por tanto, los cuásares abundaban mucho más en la época de alta densidad galáctica, cuando el universo, joven, estaba más abarrotado que ahora.

¿Qué podemos decir acerca del término medio de vida de estos monstruos? Poco que sea seguro. Las galaxias anfitrionas observadas no muestran indicio alguno de que los cuásares hayan radiado el tiempo suficiente para dañarlas. A modo de ejemplo, el gas hidrógeno de las galaxias anfitrionas no se ha ionizado gran cosa, tal como cabría esperar si los cuásares tuvieran vidas largas. Que tantas galaxias anfitrionas interaccionen, y que tales interacciones duren por lo general un período de rotación de la galaxia o menos, apunta a un término medio de vida de menos de cien millones de años. Si de la existencia de agujeros negros de enorme masa en la mayoría de las galaxias se deduce, en cada caso, que hubo una época anterior de actividad tipo cuásar, entonces la cifra pequeña de cuásares que se ha observado —un objeto por mil galaxias en su mejor época— indica que el tiempo medio de vida de un cuásar es de diez millones de años, si llega. Admitida esa cifra, el fenómeno cuásar se convierte en una fase transitoria en los diez mil millones de años de vida de una galaxia. Aunque la cantidad de energía generada por cada cuásar es enorme, sólo da cuenta de alrededor de un diez por ciento de la radiación que emite la galaxia a lo largo de toda su existencia.

Es evidente que se habrán de realizar nuevas observaciones para someter a prueba la teoría. Habrá que apuntar el Telescopio Espacial Hubble a una muestra más amplia de cuásares cercanos y buscar galaxias anfitrionas. Las muestras existentes de cuásares cercanos son demasiado pequeñas, o se han seleccionado a partir de una

gama demasiado restringida, como para garantizar la fiabilidad de las conclusiones; por otra parte, las galaxias anfitrionas se resisten a la observación con la instrumentación disponible en la actualidad.

Los astrónomos esperan realizar nuevos descubrimientos con la ayuda de dos dispositivos instalados hace poco en el Hubble: la Cámara del Infrarrojo Cercano y Espectrómetro Multiobjeto (NICMOS), que permitirá escudriñar los núcleos de las galaxias ocultos tras nubes de polvo; y el Espectrógrafo Formador de Imágenes del Telescopio Espacial (STIS), que ya ha demostrado su utilidad al detectar y pesar un agujero negro situado en una galaxia cercana en un tiempo récord, un cuarentavo de lo que se hubiera invertido anteriormente. En 1999 la NASA tiene prevista la instalación de la Cámara Avanzada, que contendrá un coronógrafo de alta resolución, del tipo que siempre se ha precisado para suprimir la deslumbrante luz del cuásar y así descubrir la galaxia anfitriona.

Necesitamos, ante todo, saber cómo y cuándo se forman los enormes agujeros negros. ¿Preceden a la formación de sus galaxias anfitrionas? ¿La siguen? Convendría, asimismo, disponer de un modelo físico que explicara exactamente cómo estos agujeros negros convierten la materia que absorben en todos los tipos de radiación de un cuásar: desde los rayos gamma a los chorros superlumínicos de radioemisiones. No será tarea fácil. Carole Mundell, del Observatorio de Jodrell Bank en el Reino Unido, comentaba en cierta ocasión que observar cuásares era como contemplar el humo del tubo de escape de un coche a una distancia considerable e intentar comprender qué está sucediendo en el interior.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PERSPECTIVES IN ASTROPHYSICAL COSMOLOGY. Martin J Rees. Cambridge University Press, 1995.

ACTIVE GALACTIC NUCLEI. Ian Robson. John Wiley, 1996.

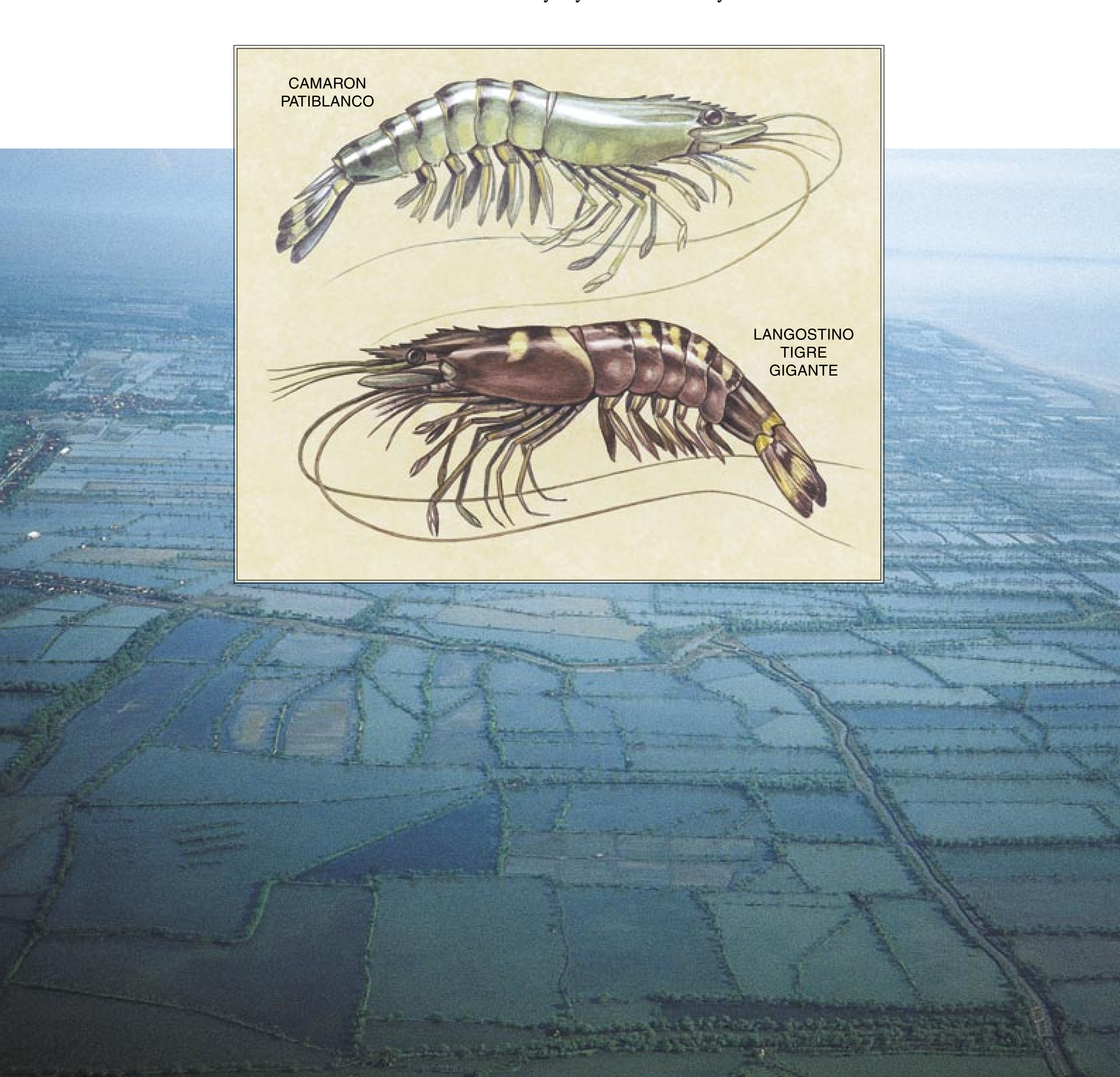
AN INTRODUCTION TO ACTIVE GALACTIC NUCLEI. Bradley Peterson. Cambridge University Press, 1997.

Para obtener más información sobre el Telescopio Espacial Hubble, acceder a http://www.stsci.edu en Internet

Acuicultura de camarones y ambiente

Un asesor de los productores de peneidos y un conservacionista presentan una receta para criar camarones de forma responsable

Claude E. Boyd y Jason W. Clay



En el Sudeste asiático, los estanques de camarones están poblados por crías de vivero. Pero en Iberoamérica se prefieren las larvas capturadas en la naturaleza, porque se las supone más robustas y mejor adaptadas a los estanques. Puesto que el precio de la progenie salvaje puede duplicar o triplicar el de los camarones concebidos en viveros, un ejército de recolectores echa sus redes al mar para capturar jóvenes camarones y vendérselos a los acuicultores. No se sabe si la pesca de tantas larvas ha reducido las poblaciones de peneidos en la naturaleza. Pero en América Central algunos camaroneros (barcos arrastreros comerciales dedicados a la pesca del camarón) se quejan de la notable caída de sus capturas cuando la gente empezó a recolectar larvas en masa en los estuarios próximos.

Aunque la pesca de larvas de peneidos proporciona un puesto de trabajo a muchos lugareños, las redes de fina malla barren cuanto les sale al encuentro. Ese excedente no deseado, la llamada "subpesca", se ha convertido en un grave problema. Aunque no hay estadísticas confirmadas, se acepta que por cada joven camarón atrapado en la red mueren 100 individuos de otras especies.

A ésos pueden añadirse los problemas ambientales generados por los propios estanques. Las balsas someras acostumbran construirse levantando diques de tierra a lo largo de su perímetro. Su superficie varía desde unos cientos de metros cuadrados hasta muchas hectáreas, con una profundidad media inferior a los dos metros. Lo habitual es que los acuicultores de peneidos bombeen agua de mar hasta los canales que la distribuirán, por gravedad, en estanques situados tierra adentro; algunas granjas de menor entidad aprovechan la marea para llenar sus estanques habilitados junto al mar.

La instalación de estanques de marea es, quizás, el factor crítico en el planteamiento del impacto ambiental. Al principio, Ecuador disponía sus estanques en salinas y otras zonas hábiles. Quedaban, pues, en lugares sin particular incidencia en el funcionamiento del ecosistema local o la conservación de la biodiversidad. Mas a medida que fueron escaseando esas tierras sacrificables, los estanques de camarones empezaron a invadir zonas de mayor importancia naturalista: humedales y bosquetes costeros de manglares tolerantes de la sal. En Tailandia y otras regiones de Asia, la acuicultura de camarones no estuvo nunca limitada a las salinas. Aunque las infraestructuras de mayor alcance tendían a evitar los manglares, aproximadamente el 40 por ciento de las granjas menores (instalaciones modestas y más o menos improvisadas) desplazaron a los manglares.

1. EL CAMARON PATIBLANCO (*Penaeus vannamei*) y el langostino tigre gigante (*P. monodon*) de Asia suponen, respectivamente, el 22 y el 58 por ciento de los peneidos criados en estanques someros (*fotografía aérea*) de las regiones tropicales.

Manglares y humedales encierran el máximo interés por la función ambiental que desempeñan y por la diversidad de especies, vegetales y animales, que dependen de ellos. Piénsese que los manglares evitan la contaminación de las aguas costeras al absorber el exceso de nutrientes y proporcionan áreas de cría protegidas para juveniles de animales marinos. De ahí que deba preocuparnos la estimación realizada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: se ha perdido ya cerca de la mitad de los bosques de manglar del mundo.

En la mayoría de los países, la destrucción de los manglares se debe a la tala de la madera para construcción o combustible. Algunas costas bordeadas de manglares, como ocurre con otros tipos de bosques, sucumben a las presiones del desarrollo, que suelen ser mayores a lo largo del litoral. Aunque de las pérdidas totales la fracción atribuible a la acuicultura de peneidos no llegue al 10 por ciento, es verdad que en algunos países esa práctica ha causado hasta el 20 por ciento del daño sufrido por los manglares; más aún, en algunas cuencas la cría de camarones es la culpable casi única.

Existen tres métodos fundamentales para la cría de peneidos en estanques. Los sistemas se clasifican en función de la densidad de camarones o langostinos que contienen; difieren también en la naturaleza del pienso usado y en la tasa de intercambio de agua entre los estanques y el océano inmediato.

Los sistemas de acuicultura extensivos crían menos de cinco camarones por metro cuadrado de estanque; los sistemas intensivos, 20 o más. A medio camino se hallan las granjas "semiintensivas". En la acuicultura extensiva se abona el estanque —con fertilizante o estiércol— para promover el crecimiento de algas que alimenten a los crustáceos. No se suministra otra comida. En una gestión semiintensiva e intensiva se les suministran diariamente pellas de harinas vegetales y de pescado, suplementos nutritivos y un aglutinante para aumentar la estabilidad del pienso en el agua. La producción durante una cosecha de 100 a 120 días no alcanza los 1000 kilogramos por hectárea en los estanques extensivos. Con métodos semiintensivos se recogen hasta 2000 kilogramos por hectárea; en algunos casos, los cultivos intensivos pueden proporcionar un valor récord de 8000 o más kilogramos por hectárea.

Para obtener un kilogramo de camarón o langostino se precisan, por término medio, unos dos de comida. Semejante discordancia obedece, en parte, a un fenómeno habitual en el mundo animal: el rendimiento obtenido por los peneidos en la conversión de alimento en carne no es del 100 por cien. Además, incluso en las condiciones mejor reguladas, hay hasta un 30 por ciento de alimento que no se consume. De ahí que se acumule en los estanques una importante cantidad de desechos en forma de pienso desperdiciado, heces, amonio, fósforo y dióxido de carbono. Por lo general, en el peneido engordado que se recolecta no se recupera más allá de la cuarta parte del carbono orgánico y de los demás nutrientes suministrados en el pienso. El exceso de nutrientes estimula el crecimiento del fitoplancton, que, al morir, se hunde y se descompone en el fondo de los estanques, consumiendo en el proceso grandes cantidades de oxígeno.

En la acuicultura tradicional, los empleados retiran periódicamente los nutrientes innecesarios, gases disueltos, fitoplancton y patógenos, arrojándolos al mar. Antaño, cada día se vaciaba al océano del 10 al 30 por ciento del agua estancada.

CLAUDE E. BOYD y JASON W. CLAY pueden representar puntos de vista distintos sobre la acuicultura de peneidos, pero ambos con autoridad. Boyd, doctor en química, enseña en el departamento de pesquerías y acuicultura de la Universidad de Auburn. Clay, formado en antropología y agricultura internacional, trabaja en el Fondo Mundial para la Naturaleza.



2. "SUBPESCA", organismos marinos que se capturan y matan involuntariamente en la pesca de arrastre. Dicha pesca suele exceder la captura de camarones marinos retenidos en las redes. En algunos casos, la relación entre subpesca y pesca de camarones se mueve en una proporción de 10 a uno.

Hoy, con la lección aprendida, se prefiere recambiar diariamente del 2 al 5 por ciento del agua. Algunos han optado por suprimir del todo ese intercambio. Han reducido la cantidad de pienso desperdiciado y mantienen a raya las enfermedades procurando no hacinar los individuos en los estanques, ni introducir larvas infectadas. Los estanques gestionados de manera intensiva disponen de aireadores mecánicos para inyectar oxígeno suplementario con el fin de evitar que la hipoxia dañe a los langostinos.

Los principales productos químicos que se vierten en los estanques son fertilizantes (para estimular el crecimiento del plancton que habrá de servir de alimento a los peneidos), caliza agrícola y cal (para ajustar la acidez del agua y del suelo subyacente). En Asia, para eliminar el amonio se agregan minerales porosos llamados zeolitas; para matar los patógenos y conjurar plagas, no es infrecuente que se viertan al estanque hipoclorito cálcico, formol y otros compuestos.

En algunas zonas, los contaminantes que liberan las granjas han superado la capacidad asimiladora de las aguas costeras inmediatas. Aun en el caso de que la calidad de los efluentes de cada estanque se encuentre dentro de los límites razonables, la suma de varias granjas termina por colmatar los ecosistemas naturales de la zona, con la consiguiente e indeseable fertilización (eutrofización) de las aguas costeras. En efecto, el problema se extiende de inmediato a todos los habitantes del litoral, incluidos los propios acuicultores, que entonces tienen que habérselas con la contaminación de sus propios caños de agua.

Pero la eutrofización no es la única amenaza. Las enfermedades víricas acechan los lugares donde la concentración de la explotación camaronera ha degradado las aguas. Tales enfermedades han precipitado en buena parte el hundimiento de la acuicultura de camarones en China y Taiwán y han producido graves dificultades en Tailandia, India y Ecuador. Los patógenos culpables viajan de un país a otro, incluso de un hemisferio a otro, en los cargamentos de camarones de granja infectados. Sin olvidar la propagación a través de camarones congelados procesados y no cocidos.

Los camaronicultores han aprendido a combatir estas enfermedades. De entrada, pueden comprobar si las larvas que compran a los viveros portan virus peligrosos. Saben, asimismo, eliminar los peneidos de estanques infectados para evitar brotes epidémicos. Algunos viveros utilizan juveniles cuidadosamente criados para asegurar que las larvas que produzcan estén libres de enfermedades. Tales avances merecen el aplauso, pero algunos acuicultores están utilizando piensos medicados, una práctica que podría favorecer la proliferación de bacterias resistentes a los antibióticos o alterar la ecología microbiana local con resultados preocupantes.

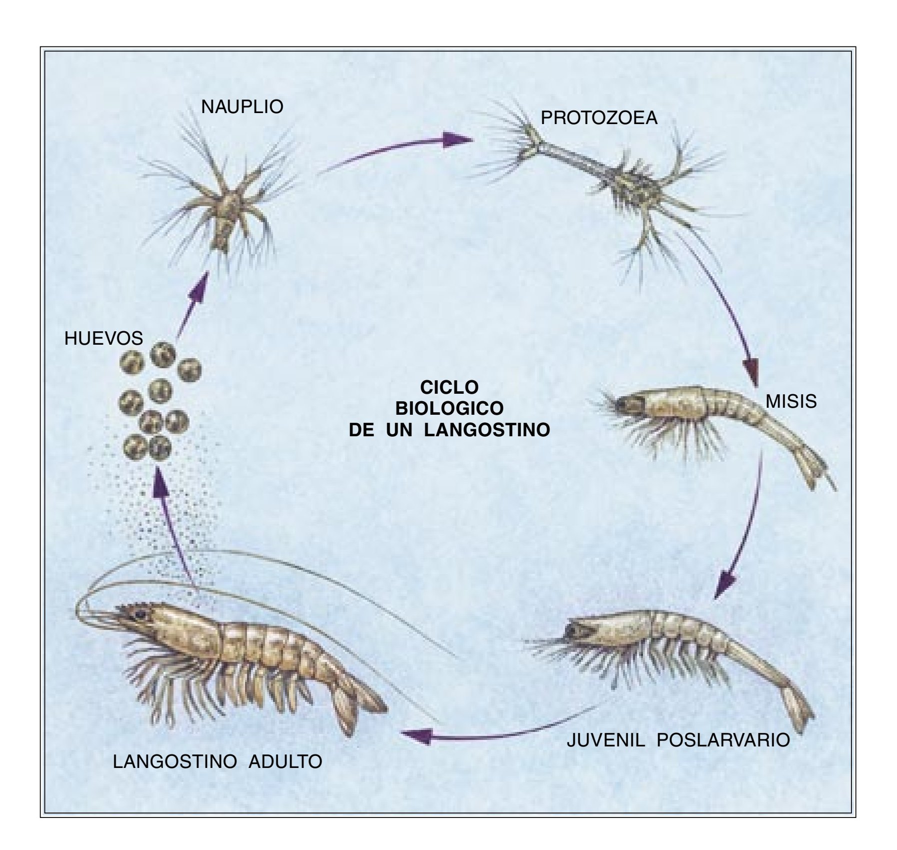
Los acuicultores han empezado a interesarse por la dimensión ambiental de su industria. Muchas medidas no tienen vuelta de hoja. Así, no deben construirse los estanques sobre suelo arenoso (a menos que se utilicen arcilla impermeable o revestimientos plásticos), para evitar la filtración de agua de mar hacia los acuíferos de agua dulce. Debiera estar prohibida la descarga de efluentes a masas de agua predominantemente dulce o a tierra seca.

Acertar en la elección del emplazamiento del estanque constituye quizás una de las bazas más obvias para amortiguar el impacto ambiental, en particular antes de preparar la infraestructura. No hay excusas para ubicar los estanques en bosques de manglar, ni siquiera en humedales de marea. Estas tierras no son adecuadas para una acuicultura de peneidos persistente; con frecuencia tienen suelos incompatibles con la producción de camarones a largo plazo y, lo que es más preocupante, resultan vulnerables a las tormentas costeras.

Las grandes factorías actúan con mayor rendimiento para sus intereses y mayor respeto para el entorno. No dañan los manglares. Antes bien tienden una red de canalización por la que transportan el agua oceánica a través de los manglares costeros hasta los estanques situados tierra adentro. Muchas empresas pequeñas forman ahora cooperativas para aunar los recursos y el conocimiento necesarios que les permitan una gestión eficaz. En Indonesia, la ley exige a los grandes productores que ayuden a los pequeños camaronicultores.

Los propios camaronicultores debieran ser los primeros interesados en conocer la rentabilidad de mejores prácticas. La construcción de estanques adecuados para camarones cuesta de 1,5 a 7,5 millones de pesetas por hectárea. Abandonar las instalaciones a los pocos años por su inadecuada situación no sólo causa un impacto ambiental considerable, sino que resulta también derrochador. Los acuicultores de peneidos harían bien en establecerse lejos de los manglares.

Hay otros cambios sencillos de los que se beneficiarían el ambiente y la cuenta de resultados. Vemos, por ejemplo, que se siembra a voleo grandes cantidades de comida en los estanques una o dos veces al día. Si en vez de ello se repartiera el alimento en menor cantidad y





3. CICLO BIOLOGICO de los peneidos (*arriba*), en el que los huevos hacen eclosión y el decápodo crece pasando por varios estadios antes de convertirse en adulto. Podemos provocar el ciclo entero en las granjas camaroneras. En una gestión respetuosa con el entorno, los camarones se crían primero en tanques de viveros (*izquierda*) y después son engordados hasta el tamaño final en estanques situados lejos de los bosques de manglar (*abajo izquierda*). Pero muchos acuicultores crían jóvenes camarones capturados en la naturaleza (*derecha*); algunos de ellos construyen incluso estanques allí donde antes se erguían los manglares (*abajo derecha*), prácticas que pueden infligir daños considerables al ambiente.











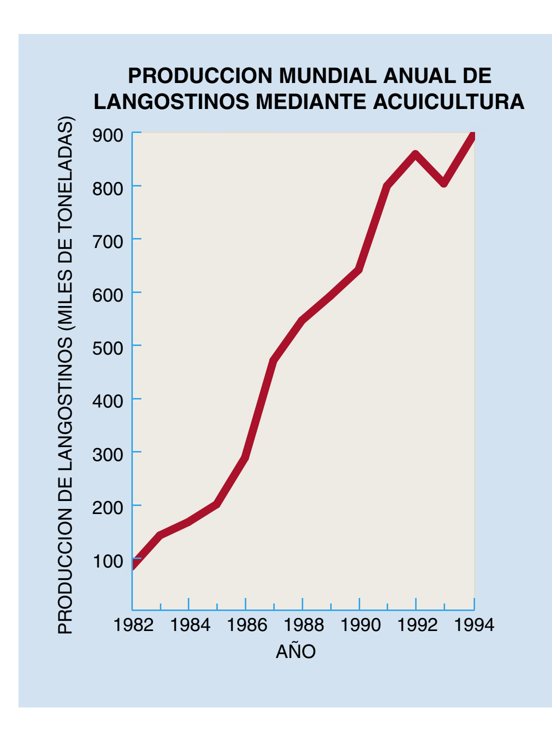
La camaronicultura, es decir, la acuicultura o cría de camarones o langostinos (crustáceos decápodos nadadores de la familia peneidos), empezó a ser rentable en los años setenta. Desde entonces se ha expandido por todas las regiones tropicales. Tailandia, Indonesia, China, India y otros países asiáticos dedican alrededor de 1,2 millones de hectáreas de su suelo a estanques de langostinos. En el hemisferio occidental, unas 200.000 hectáreas de litoral han sufrido pareja transformación. Rara esa práctica en los Estados Unidos, donde no llegan a 1000 las hectáreas reservadas a su cultivo, hay al menos 130.000 hectáreas de Ecuador convertidas en estanques de camarones. El marisco así producido acaba de forma casi indefectible en la mesa de estadounidenses, europeos o japoneses.

Aclamada como la "revolución azul" hace un cuarto de siglo, la cría de camarones, igual que otras formas de acuicultura, parecía ofrecer una salida a la presión ejercida en las poblaciones naturales con la sobrepesca. La camaronicultura prometía también limitar los daños colaterales que la pesca de arrastre empleada en la captura de estos organismos producía sobre otras especies marinas; con ese arte se sacan del mar diez kilogramos de otros organismos por cada kilogramo de camarones. Pero ninguna de esas esperanzas se ha visto cumplida del todo. Antes bien, como demuestran los últimos veinte años de cría de peneidos, la acuicultura crea sus propios problemas ambientales.

Los camarones frezan en el océano. La hembra suele emitir 100.000 o más huevos por vez. A las 24 horas, los huevos fecundados eclosionan en forma larvaria y empiezan a alimentarse de plancton. Terminada la fase de larva (al cabo de unos 12 días), los jóvenes camarones migran del océano abierto a estuarios ricos en nutrientes, donde crecen hasta llegar a juveniles más robustos. Vuelven al mar para madurar y reproducirse.

En lo posible, la acuicultura de camarones intenta repetir el ciclo biológico natural. En los viveros se induce la freza de la población reproductora mediante la manipulación de la iluminación, la temperatura, la salinidad, los ciclos hormonales y los nutrientes. Una vez los huevos han hecho eclosión, se trasladan las larvas desde el vivero al tanque de cría, donde puedan madurar. Durante los estadios iniciales, los minúsculos camarones se alimentan de algas microscópicas. Cuando las larvas han crecido un poco más, se les suministran artemias salinas y piensos preparados. Los cuidadores mantienen a esos jóvenes en tanques de cría unas tres semanas más, antes de transferirlos a estanques mayores.

4. LA ACUICULTURA de camarones se viene practicando desde hace siglos. Pese a ello, sólo en las dos últimas décadas se han criado peneidos en masa (*derecha*). Las principales naciones productoras de camarones (*extremo derecha*) se encuentran a caballo del ecuador en Asia y las dos Américas.



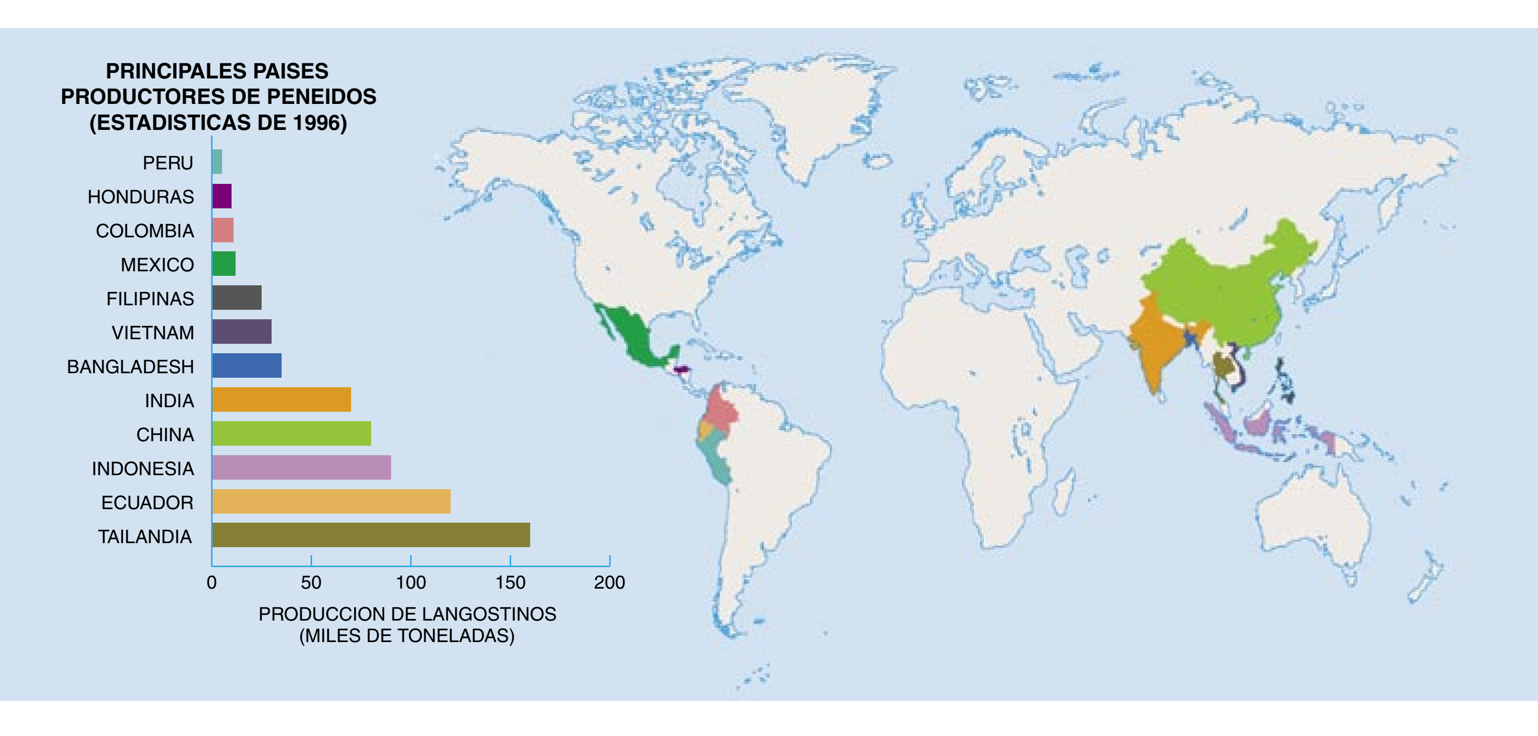


5. LOS MANGLARES TOLERANTES a la sal (*izquierda*) bordean todavía muchas costas tropicales, aunque casi la mitad de los que existían en el mundo han sido destruidos por el hombre. La fracción de dicha destrucción que corresponde a la acuicultura de peneidos irresponsable (*derecha*) no llega al 10 por ciento de la pérdida total, pero en algunas localidades la camaronicultura es la principal amenaza a los manglares.

a intervalos más frecuentes, y se conjugara esa práctica con el uso de comederos, se ahorraría en comida y se producirían menos desechos. Los piensos mejorados (que utilizan mayor cantidad de proteína vegetal y menos harina de pescado) son más digeribles, parecen perdurar más en el agua y producen asimismo menos desperdicios. Con tales medidas reduciríamos la sobrepesca para abastecer los camarones, se ahorraría dinero en comida, se limitaría la contaminación y recortaríamos gastos de limpieza. En resumen, aumentarían las ganancias.

Se reduce la contaminación del agua si evitamos la acumulación excesiva de juveniles en los estanques y limitamos la cantidad de agua que se intercambia con el mar. Con una densidad de camarones adecuada, los procesos naturales del interior del estanque asimilan buena parte de los desechos en el suelo subyacente. Y aunque el estado actual de la técnica requiere el drenaje de los estanques para la cosecha, los operadores pueden hacer pasar fácilmente el agua a través de estanques de instalación para promover la desnitrificación y eliminar otros muchos contaminantes asociados a los sólidos en suspensión. Los camaronicultores no deben mezclar agua dulce con el agua de mar de los estanques para reducir la salinidad. Esta práctica (abandonada por casi todos los acuicultores de peneidos) es innecesaria y tendría que prohibirse para evitar una carga excesiva en los suministros de agua dulce.

Mayor dificultad entraña la resolución de las amenazas contra la biodiversidad. Desaparecerían muchos problemas si los acuicultores criaran sólo peneidos obtenidos en viveros, regularan la importación de crías y camarones juveniles y cultivaran sólo especies nativas. Con filtros de en-



Notas de un asesor de la industria camaronera

No puede negarse que los acuicultores camaroneros y los órganos gubernamentales negligentes son culpables del impacto ambiental que han producido una planificación y una gestión deficientes. Pero la acuicultura de peneidos no es, de suyo, perniciosa para el ambiente. Algunos ecologistas se han excedido en sus condenas generalizadas e injustas contra la industria.

Se acusa a la acuicultura de peneidos de que los inversores, una vez enriquecidos, abandonan las granjas a su suerte. Aquí los críticos se equivocan de medio a medio. Si algunas granjas camaroneras resultaban gravosas y, por tanto, se abandonaban, solían ser pequeñas, formadas a menudo por uno o dos estanques mal construidos, abiertos en lugares inadecuados y gestionados sin capital ni experiencia suficientes. Las granjas camaroneras bien situadas y bien construidas cuestan del orden de 1,5 a 7,5 millones de pesetas por hectárea de estanque. Tampoco su gestión es barata. Las inversiones realizadas no tardan en rentabilizarse, lo que explica el interés de que las granjas sean productivas durante muchos años.

La acuicultura de peneidos constituye un ejemplo interesante de un fenómeno poco atendido: aquel en que el impacto ambiental más agresivo procede de los operadores pequeños, no de los mayores. Los acuicultores a pequeña escala podrían aunar sus recursos en cooperativas o asociarse para mejorar la gestión. Las instalaciones bien gestionadas emplean bastantes trabajadores a lo largo del proceso (viveros, granjas y plantas procesadoras); en concreto, se habla de uno o dos empleados por cada hectárea de estanque en funcionamiento. La acuicultura de peneidos estimula asimismo las economías locales y proporciona importantes ingresos para muchos países en vías de desarrollo.

Sería una pérdida lamentable para muchas personas el que la camaronicultura desapareciera. De lo que se trata es de alcanzar una buena gestión. Los camaronicultores no ignoran el daño potencial que su industria puede infligir. Saben que su éxito a largo plazo depende de mantener condiciones saludables para los camarones, que su prosperidad depende de la calidad ambiental a lo largo de las costas inmediatas. La degradación de la zona costera plantea mayores dificultades a la acuicultura. No cuesta mucho convencer a los interesados sobre la importancia de la buena gestión.

Varios acontecimientos recientes nos hablan de un nuevo talante, más sensible, de los acuicultores de peneidos hacia el entorno. La Asociación de Criadores de Camarones Australianos ha establecido un código de procedimientos para sus miembros; la Asociación de la Red de Pesquerías de las Naciones del Sudeste Asiático ha publicado un manual de buenas prácticas para la acuicultura de camarones; y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura ha presentado pautas técnicas para pesquerías responsables que son de aplicación a la acuicultura de peneidos. Además, la Red de Centros de Acuicultura en Asia y el Pacífico ha creado un plan detallado para mejorar la sostenibilidad de la acuicultura en general.

Más cabe esperar de las reuniones científicas y comerciales que se han centrado en la conexión entre la acuicultura de peneidos y el ambiente. La mayoría de los países exigen informes de impacto antes de aprobar nuevas granjas de camarones. Merece citarse la Alianza Global de Acuicultura, de constitución reciente. Este grupo industrial está propiciando la acuicultura de peneidos responsable, desarrollando un código de procedimientos y promoviendo la conciencia del consumidor con una “etiqueta ecológica” para los peneidos cultivados de manera respetuosa con el ambiente.

—Claude E. Boyd



COMPROBAR EL SUELO y el agua de los estanques para camarones requiere el tipo de conocimientos que uno de los autores, Boyd, comparte con los productores de camarones de todo el mundo, a través de talleres y giras de asesoramiento.

trada, no quedarían atrapados en sus sistemas de bombeo los organismos marinos de cierta talla.

Los gestores harían bien en prestar atención a los aditivos químicos. Aunque la mayoría de los compuestos utilizados tienen un historial de uso seguro, suele ser innecesaria la aplicación de compuestos químicos distintos de la caliza agrícola, la cal y los fertilizantes. En los contados casos en que se precisa el uso de antibióticos, compete a la autoridad veterinaria evaluar las sustancias químicas utilizadas y prohibir las que encierren un peligro potencial, o al menos asegurarse de su empleo seguro.

Los gobiernos debieran exigir un estudio del impacto ambiental y social antes de la construcción de nuevas granjas camaroneras. Con esa investigación aflorarían las probabilidades de alteración del entorno y los problemas implicados en el uso del suelo y el agua. Una vigilancia gubernamental que tendría que persistir en el transcurso del tiempo.

Las innovaciones técnicas prometen ayudar a los camaronicultores en la reducción de la descarga de

Comentarios de un conservacionista

Muchos empresarios creen que los recursos están ahí, para quien quiera tomarlos. Sólo deberán pagar el trabajo y la inversión para extraerlos. Pero no piensan ni en el coste de la sustitución, ni en el del mantenimiento de los mismos. En ningún otro dominio se da semejante estrechez de miras como entre los acuicultores de camarones, que con frecuencia se apropian de recursos públicos, tradicionalmente empleados por muchos grupos diferentes.

En las granjas más avanzadas y mejor gestionadas se han introducido ya prácticas más coherentes con los postulados del desarrollo viable. Pero hay cientos de miles de acuicultores repartidos por todo el mundo. Y cada uno no sólo toma decisiones que afectan a su propio futuro, sino también al del resto del sector. Tal como se viene realizando, la acuicultura camaronera chocará contra las exigencias de un crecimiento respetuoso con el entorno, así que pasen unos decenios.

Quizá no exista un sistema ideal, de sostén perdurable, al menos con los conocimientos actuales. Pero la mayoría de los acuicultores de peneidos y de otros afectados por dicha industria estarían de acuerdo en que algunos procedimientos son mejores que otros. Están convencidos también de que el sector saldría ganando con la rápida adopción de nuevas técnicas.

Varias son las razones comerciales para adoptar métodos mejores (más rentables y menos agresivos). Por ejemplo, el aumentar la tasa de supervivencia de los camarones jóvenes (cifrada en menos del 50 por ciento) hasta por encima del 75 por ciento reduciría el desembolso inicial que requiere cada cosecha. Con un suministro alimentario mejor calculado recortaríamos gastos de comida en una cuarta parte, si no en la mitad. A su vez, ese par sencillo de modificaciones nos rebajaría los costes de limpieza de los efluentes y del traslado periódico de los estanques. Así han doblado sus ingresos los ecuatorianos.

Aunque otras mejoras pueden ser más caras, el aumento espectacular de los ingresos compensará la inversión. Sépase, sin embargo, que no todas las inversiones obligadas traerán un mayor rendimiento. Algunos costes deberán repercutir en los consumidores, que son, después de todo, los últimos contaminadores en el sistema económico. La administración pública podría gravar los precios al consumo o proteger la venta de los camarones procedentes de estanques respetuosos con el medio. Ello obligaría a que los productores que reclamaran semejante protección garantizaran la veracidad de sus alegaciones.

¿Quién establecerá las pautas para una producción de camarones y langostinos que respete el equilibrio del entorno? Ecologistas, industriales y gobiernos están desarrollando sus propias directrices para la acuicultura de camarones viable. Pero ningún grupo por sí solo, y ciertamente no los industriales por sí solos, podrán crear un sistema creíble. Conseguir dicho objetivo requerirá que estos diferentes grupos se pongan de acuerdo sobre principios generales, que después podrán adaptarse a condiciones locales específicas. Sólo mediante la adopción de sistemas de producción que no atenten contra la naturaleza la acuicultura de peneidos formará parte de la solución para el próximo milenio, en vez de constituir otro problema a resolver.

—Jason W. Clay



PROTEGER A LOS PUEBLOS indígenas mediante prácticas comerciales responsables es una pasión para uno de los autores, Clay, que se formó en antropología y economía antes de incorporarse al Fondo Mundial para la Naturaleza.

aguas sucias y en la prolongación de la vida de sus estanques. Con mejores programas de cría se obtendrán razas resistentes a las enfermedades. Cualquier innovación de éstas costará algo más a corto plazo, pero a la larga se compensará con creces, al mejorar el rendimiento y perdurabilidad de sus operaciones.

En la industria camaronera se advierte ya cierta sensibilidad ante el entorno. A ese respecto, se han ido depurando muchas operaciones. En conjunto, sin embargo, la industria ha de acometer todavía una profunda transformación para alcanzar los niveles que permitan su funcionamiento de manera indefinida en el mismo lugar. Sólo cuando llegue a este punto la acuicultura camaronera podrá considerarse un tipo de explotación agrícola más.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MARKET POTENTIALS FOR REDRESSING THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF WILD-CAPTURED AND POND-PRODUCED SHRIMP. J. W. Clay. World Wildlife Fund, Washington, D.C., 1997.

TOWARD SUSTAINABLE SHRIMP AQUACULTURE. J. W. Clay en *World Aquaculture*, vol. 28, n.º 3, págs. 32-37; 1997.

PERFILES

Gary Stix

JOEL SCHWARTZ: En el lugar del crimen

Piedra en el zapato de la industria, Joel Schwartz sostiene que las macropartículas del aire acortan la vida humana. Su investigación ha provocado en los Estados Unidos que se legisle una normativa más estricta sobre la calidad del aire.

Joel Schwartz es la antítesis del epidemiólogo funcionario, el cauto estadístico que nunca acaba de pronunciarse sobre plausibles asociaciones entre la exposición a los contaminantes y la enfermedad. A las depuradas técnicas estadísticas del método que emplea para descubrir la relación entre finas partículas de la combustión y muerte prematura se agrega su talante provocador. "Si alguien cree que todo lo que debe hacer un profesional de la salud pública es dedicarse a escribir artículos para hinchar el currículum, que se busque otro trabajo", afirma.

Schwartz tuvo mucho que ver con las investigaciones que instaron las nuevas regulaciones de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), del año pasado, sobre reducción de niveles de partículas de 2,5 micras o menos de diámetro. Estas partículas resultan de la combustión en plantas industriales, la quema de madera y los motores de vehículos. Durante el debate sobre las nuevas normas, arreciaron las críticas de los portavoces de la industria contra este quijote con retranca, de elevada estatura, barba entrecana y carácter abierto.

Pero la influencia de Schwartz se debe a su técnica sólida y a la tenaz defensa de sus ideas. "Los analistas que contrataban las industrias conforme iba ganando respeto el trabajo de Joel, tardaron en ponerse al corriente de su análisis estadístico", recuerda Daniel Greenbaum, presidente del Instituto de Investigación sobre los Efectos en la Salud, una asociación sin ánimo de lucro financiada por la EPA y la industria.

A sus 50 años, Schwartz estaba adscrito a una célula de investigadores sobre la contaminación del aire que, a finales de los años ochenta, empezaron a sacarle partido al análisis de series temporales (consistente en examinar el cambio de una variable respecto a otra en el curso del tiempo). Los economistas habían manejado ya las series temporales para llevar la cuenta de la contaminación del aire. Estas técnicas, junto con otros métodos que consideran efectos no lineales —por ejemplo, bruscos aumentos de mortalidad debidos a las temperaturas extremas—, permiten computar las enfermedades y la mortalidad día a día, conforme suben y bajan los niveles de contaminación atmosférica. Utilizando series temporales se descartan variables confundentes, verbigracia, que el paciente fume o que tenga la presión alta. No es probable que lo que fuma al día una persona guarde correlación con los cambios en las macropartículas que contaminan el aire.

El proceso de obtención de datos se simplifica mucho al excluir detalles de este jaez. El investigador puede buscar certificados de defunción, admisiones en los hospitales y otros datos accesibles al público sin necesidad de recabar fondos para pagar a los colaboradores de un estudio multimillonario. "Hace que las cosas sean más baratas", dice Schwartz. "Todo lo que se necesita es un poco de dinero para pagar un sueldo mientras se están procesando los números." A principios de los noventa, Schwartz abrió la caja de los grillos con esos estudios que mostraron, en una ciudad tras otra de los Estados Unidos, asociaciones entre niveles de macropartículas bastante bajos y muertes o enfermedades respiratorias o cardiovasculares. Acaba de colaborar en estudios similares llevados a cabo en Europa.

Puede que esas vetas innovadoras que sazonan los trabajos de Schwartz provengan de su formación: es físico teórico del estado sólido y matemático, no epidemiólogo. "La mente del físico es mucho más inquieta que la del médico, quien debe evitar la muerte de los pacientes", señala. "En física, cuanto más rápido se tengan ideas delicuescentes, antes se discierne cuáles son las correctas y cuáles las equivocadas." Cuando Schwartz salió de la Universidad Brandeis a mediados de los setenta, no encontró trabajo como físico. Tras emplearse de



El estilo rebelde de Joel Schwartz, de la Universidad de Harvard, se conjuga con un prodigioso dominio de la técnica

ujier en el Congreso, se incorporó a la oficina política de la EPA en 1979 como economista energético.

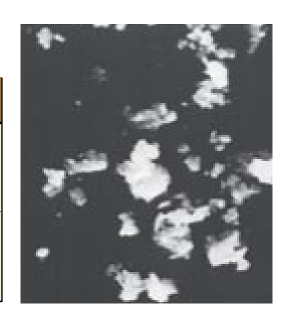
A principios de los ochenta, Schwartz dejó su impronta en la agencia. Por entonces la administración Reagan intentaba detener la progresiva eliminación del plomo de la gasolina en el marco de un proyecto regulador más amplio. Sus supervisores le pidieron que elaborara un estudio para mostrar los ahorros de la industria una vez que se retiraran las normas para reducir el plomo. "Lo hice, y me pregunté cuál era la otra cara de la moneda", se explaya. Emprendió por su cuenta un análisis que revelaba que los 100 millones de dólares, más o menos, que se ahorraría la industria se quedarían pequeños frente a los costes médicos, cifrables en más de mil millones de dólares anuales. Su estudio ayudó a persuadir a la agencia para que cambiara de postura y endureciera su normativa. En 1985, en colaboración con su esposa Ronnie Levin, Schwartz realizó un nuevo estudio de coste y beneficios que inclinó la balanza del lado de otras normativas adicionales en pro de la eliminación total del plomo en la gasolina.

A mediados de los ochenta, Schwartz comenzó a describir su propio trabajo como el de un epidemiólogo centrado en la contaminación del aire. A sabiendas, evitó Superfund y otros proyectos sobre residuos peligrosos que consumían muchos de los recursos de la agencia. "Aun cuando ocurra algo con los residuos peligrosos, su incidencia en la salud pública general no será lo peor", aventura. "Ese no es el lugar del crimen. Yo me veo como un investigador que busca en escenarios abandonados, donde el impacto en la salud pública general probablemente sea grande."

En 1986 volvió a revisar un estudio de 14 años de duración sobre la contaminación del aire y los datos sanitarios en Londres. Las macropartículas (y no el dióxido de azufre) parecían estar ligadas con la muerte precoz y las enfermedades. El análisis de Schwartz ayudó a confeccionar una normativa que fijó una media diaria y anual de materia en partículas con un diámetro de 10 micras o menos, llamada PM10. Pero le pareció que la normativa no era suficiente, porque su investigación había demostrado que no existía un umbral detectable por debajo del cual la gente dejara de enfermar. La normativa de la EPA no tuvo en cuenta partículas menores, producidas por la combustión de centrales térmicas, camiones y otras fuentes. Schwartz continuó sin desmayo: "Seguí sacando estudios usando datos de los Estados Unidos hasta que la gente ya no pudo dejar de hacerles caso."

NORMATIVAS PARA LA MATERIA EN PARTICULAS (MICROGRAMOS POR METRO CUBICO DE AIRE)

	NORMATIVA	NORMATIVA
PARTICULAS DE DIAMETRO ≤ 10 MICRAS		
MEDIA DIARIA	150	150
MEDIA ANUAL	50	50
PARTICULAS DE DIAMETRO ≤ 5 MICRAS		
MEDIA DIARIA	NINGUNA	65
MEDIA ANUAL	NINGUNA	15



Las partículas finas que miden 2,5 micras o menos de diámetro (fotografía) *son objeto de una nueva normativa federal*

En reconocimiento de su trabajo sobre el plomo y las partículas, recibió en 1991 el premio MacArthur, que le proporcionó también una vía de escape de su garito sin ventanas de la EPA. "Estaba claro que la PM [materia particulada] se estaba poniendo al rojo vivo. Si todavía fuera un empleado federal, me habrían hostigado a muerte." La bolsa de 275.000 dólares libre de impuestos le permitió afrontar un sueldo menor al aceptar un empleo de profesor asociado en la Escuela de Salud Pública de Harvard y comprar una casa cerca de Boston.

Se veía venir. En los años que precedieron a la entrada en vigor de las nuevas reglas, Schwartz y sus colegas Douglas Dockery, de Harvard, y C. Arden Pope III, de la Universidad Brigham Young, vieron cómo sus estudios sufrían una violenta embestida, con frecuencia por parte de científicos pagados por el sector industrial.

Suresh Moolgavkar, de la Universidad de Washington, cuyas investigaciones las financiaba el Instituto Americano del Hierro y del Acero, le puso contra las cuerdas. Los hallazgos de Moolgavkar mostraban que las alegadas relaciones con unas tasas de mortalidad más altas no se podían atribuir exclusivamente a las macropartículas. El dióxido de azufre, el monóxido de carbono, el ozono y otros contaminantes podrían haber contribuido también. Schwartz responde que relaciones similares entre las muertes prematuras y macropartículas se pueden encontrar en ciudades donde los niveles de uno o más de los otros contaminantes que pudieran crear confusión son mucho más bajos.

El fragor del debate aumentó el año pasado, cuando los investigadores de Harvard fueron vapuleados al negarse a revelar a otros científicos los datos originales de su "Estudio de Seis Ciudades", un informe profusamente citado en el que se encontró una relación entre las macropartículas y la tasa de mortalidad durante un período de 16 años. Dockery, jefe de grupo, rehusó alegando los acuerdos de confidencialidad con los sujetos estudiados. Los datos se facilitaron más tarde al Instituto de Investigación sobre los Efectos en la Salud para su análisis ulterior. Mas no antes de que Schwartz saliera en el *Wall Street Journal* defendiendo al equipo del estudio frente a los que él llamaba "matones de la industria", es decir, voceros con título de su amo.

Aunque la EPA promulgó el pasado mes de julio nuevas normativas para el ozono y también para las partículas de 2,5 micras, la controversia que rodea el asunto asegura la continuidad de la pugna de intereses. La agencia está procediendo con cautela, tomándose varios años para llevar a cabo estudios científicos y registros de partículas antes de que los estados se vean obligados a proponer sus planes de ejecución. Las regulaciones, de hecho, permiten que los estados se tomen más de una década en ajustarse estrictamente a la normativa, para disgusto de Schwartz. "Vamos a posponer la salud pública durante 14 años", dice. "No lo verán quienes mueran."

El ritmo de Schwartz, sin embargo, no ha perdido vigor. En un artículo que publicó en el número de noviembre de *Epidemiology* se recurría al análisis de series temporales para encontrar una relación entre la turbidez del agua potable filtrada (un posible indicador de contaminación microbiana) y las urgencias y los ingresos por molestias gastrointestinales en un hospital de Filadelfia. "Me estoy metiendo en problemas en otro campo", señala, comentando un ataque de las compañías de aguas tras la publicación de su artículo.

Sobrevivir al fuego

El madroño y la encina

Es prodigiosa la capacidad de regeneración que poseen los ecosistemas mediterráneos tras un incendio forestal y, en general, después de una perturbación. Vuelven a recuperar su estructura y funcionamiento. Esa resiliencia, nombre técnico del fenómeno, remite a la facultad de las especies vegetales para regenerar la parte aérea destruida por culpa de la perturbación.

Muchas plantas regeneran la parte vegetativa mediante la formación de nuevos brotes —rebrotes— a partir de yemas protegidas que no se han visto afectadas por el fuego. Los rebrotes pueden formarse a partir de la raíz, la cepa —lo más habitual— o incluso del tronco y la copa, como en los alcornoques; éstos, gracias al corcho, pueden mantener viva buena parte de sus tejidos. La mayoría de los árboles y arbustos de tipo mediterráneo rebrotan con vigor de cepa tras el fuego. Lo vemos en la encina, el roble, el madroño, el labiérnago, el lentisco y la coscoja.



Rebrotes de encina (Quercus ilex)



Rebrotes de madroño (Arbutus unedo)

La formación de rebrotes permite una recuperación bastante rápida de la estructura de la comunidad, ya que presentan una elevada tasa de crecimiento. Ese fenómeno reviste particular interés en zonas expuestas a la erosión, ya que los rebrotes afirman el suelo frágil y lo protegen frente a lluvias torrenciales.

Otras especies, carentes de la capacidad de formar rebrotes, mueren cuando el fuego quema su parte aérea. Para sobrevivir a la perturbación, deben fiarse de la germinación de semillas resistentes o llegadas desde otras zonas. Se regeneran exclusivamente a partir de semilla los pinos, las estepas y el romero.

Entre las especies rebrotadoras de España destacan por su importancia ecológica y paisajística el madroño (*Arbutus unedo*) y la encina (*Quercus ilex*). El madroño es una planta de amplia distribución en la cuenca mediterránea. De aspecto arbustivo, puede alcanzar las dimensiones y porte de árbol. Tras el fuego, el madroño suele rebrotar vigorosamente de cepa, que desarrolla en un notable engrosamiento. En su parte central, lignificada y muerta, almacena agua y carbohidratos, mientras que en los tejidos más externos se encuentran las yemas que darán lugar a los rebrotes. Los estudios desarrollados en Cataluña tras los fuertes incendios de 1986 cifraron en un 68 % los madroños que rebrotaron. Este porcentaje variaba notablemente —entre el 60 y el 95 %— en función de las condiciones ambientales, sobre todo la precipitación, y de las características propias de cada pie.

El número de rebrotes producidos por cada madroño depende del tamaño de la cepa. Oscila desde unos pocos hasta varios centenares. Los rebrotes presentan unas tasas de crecimiento muy elevadas, en comparación con los individuos adultos, a causa de la movilización de recursos de la cepa y de la existencia de un amplio sistema radicular, que permite un gran aporte de agua y nutrientes. En algunas áreas de clima húmedo se han medido rebrotes de hasta dos metros de altura

dos años después del incendio, aunque estas tasas guardan estrecha relación con los factores ambientales, con la precipitación sobre todo.

El elevado crecimiento conduce muy pronto a una intensa competencia por la luz, que conlleva una drástica reducción del número de rebrotes a lo largo del tiempo; acabarán por seguir desarrollándose sólo los más vigorosos.

Los rebrotes de mayor tamaño florecen al año del incendio. Tras un fuego de verano, se produce un vigoroso crecimiento de los rebrotes durante el otoño y la primavera posteriores. Llegado el otoño siguiente, hay floración. La maduración de los frutos dura un año. Observamos, pues, que pasados dos años y medio del fuego aparecen las primeras semillas.

La encina caracteriza el paisaje mediterráneo. Presenta un sistema radicular profundo, constituido por una raíz pivotante principal, muy distinta de las raíces superficiales del madroño. Las hojas, pequeñas, gruesas y con abundante pilosidad contrastan también profundamente con las hojas grandes, tiernas y lisas del madroño. La encina suele rebrotar de cepa tras el fuego, aunque puede hacerlo también de raíz y tronco en caso de tala. De acuerdo con los estudios mencionados rebrotó el 87 % (variando entre el 82 y el 96 %), lo que refleja la capacidad de regeneración de esta especie.

Lo mismo que el madroño, la encina produce muchos rebrotes. Puede desarrollar una cepa subterránea, resultante de rebrotes acumulados, sobre todo en los encinares talados regularmente. Es frecuente el rebrote en corona: la parte central de la cepa se halla lignificada y los rebrotes crecen desde su perímetro. Los rebrotes de encina se desarrollan con gran rapidez, sobre todo en primavera y otoño; pueden mantener el ritmo de crecimiento incluso en verano, gracias al suministro de agua a través de sus profundas raíces.

Las tasas de crecimiento en altura de los rebrotes de la encina son similares a las del madroño, aunque acostumbran ramificarse y conformar una cepa de follaje denso e impenetrable. La biología reproductiva de la encina se ve profundamente afectada por los incendios, pues los rebrotes tardan años en florecer: de siete a diez, según la mayoría de las observaciones.

Pese a la reconocida capacidad de regeneración de las especies mediterráneas, el alto número de incendios desencadenado en los últimos decenios ha ejercido un fuerte impacto en los sistemas naturales y en el paisaje. Con su frecuente recurrencia los incendios forestales merman la capacidad de regeneración, por la muerte de parte de los individuos rebrotadores y la menor disponibilidad y germinación de semillas. Este proceso va unido a graves problemas de erosión de suelos y constituye en su conjunto uno de los peligros más graves que se ciernen sobre la región mediterránea.

CARLES CASTELL PUIG
Servicio de Parques Naturales
Diputación de Barcelona

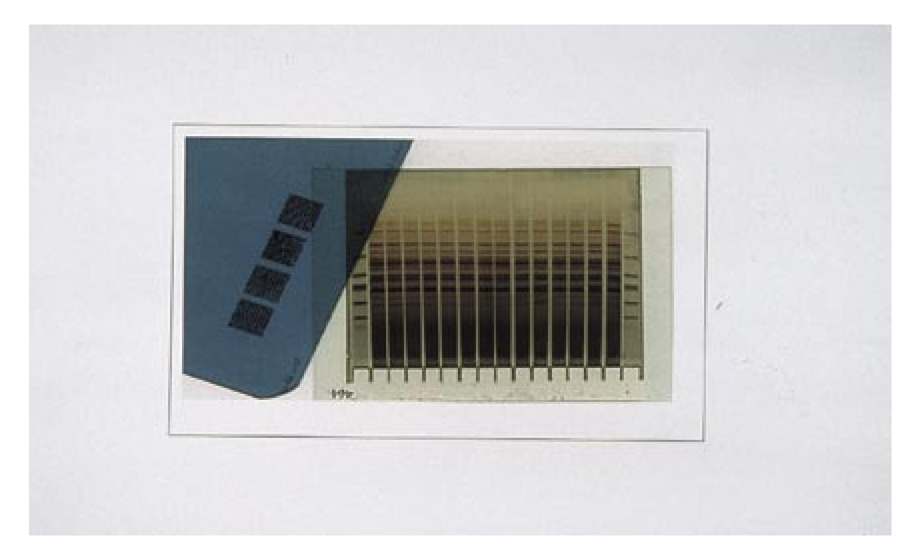
Técnicas genéticas

Para el rastreo de ácidos nucleicos

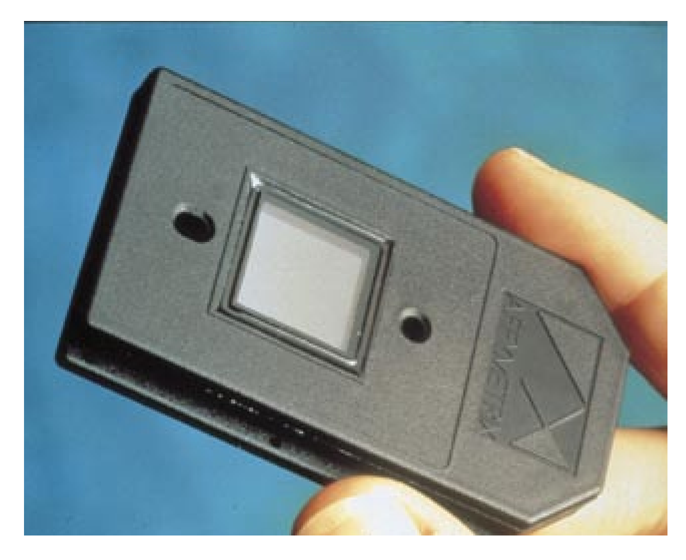
La constitución genética de un individuo se halla escrita en sus ácidos nucleicos. Hacia éstos hemos de encaminarnos, con las técnicas habituales de la biología molecular, para conocer sus rasgos característicos. Igual que se recurre a las huellas dactilográficas o los grupos sanguíneos para identificar a los individuos, debe acudirse a las huellas genéticas para descifrar el parentesco entre especies o entre individuos. Las huellas generan marcadores que permiten no sólo la cartografía genética, sino también la mejora vegetal, animal o microbiana.

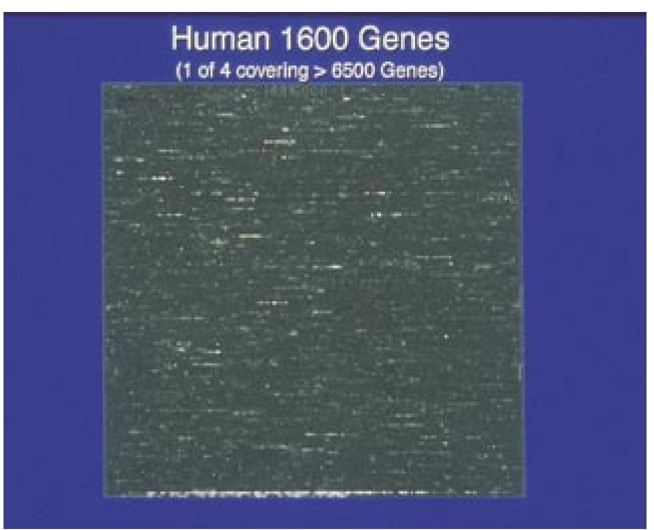
En los últimos años, han venido apareciendo numerosas técnicas que han simplificado el análisis de secuencia de los ácidos nucleicos, al ceñirse a determinados sitios de ADN o ARN variables. Estas técnicas producen perfiles genéticos mediante la unión (hibridación) selectiva de sondas marcadas o la copia (amplificación) generalmente exponencial de determinados sitios de los ácidos nucleicos. Así, para descubrir la existencia de "polimorfismos en fragmentos de restricción" (RFLP) se recurre a la fragmentación enzimática del ADN, su transferencia a membranas y el uso de sondas de ADN marcadas con isótopos radiactivos o con fluorescencia.

Si, por el contrario, interesan sitios hipervariables del ADN (microsatélites y minisatélites), éstos se multiplican usando la "reacción en cadena de la polimerasa" (PCR). En este caso, el proceso de multiplicación (también llamado de amplificación) está dirigido por pequeños trozos sintéticos de ADN, los "oligonucleótidos iniciadores", y mediado por la acción de polimerasas termoestables, enzimas capaces de duplicar los ácidos nucleicos. La reacción transcurre



1. Huellas genéticas arbitrarias en geles de poliacrilamida y en células de hibridación. Las bandas del gel de la izquierda corresponden a fragmentos de ADN teñidos con plata y separados en razón del peso molecular. Cada grupo de fragmentos identifican a un organismo, en este caso cultivares individuales de pastos (Cynodon). *En la derecha, cada señal positiva de hibridización en una célula de fragmentos de ADN queda registrada en una película fotográfica y representa la existencia de cierta secuencia de 9 bases, única, en una huella genética arbitraria de la bacteria* Escherichia coli





2. Células de hibridación ("chips") de ADN que contienen miles de oligonucleótidos. Miden sólo un centímetro cuadrado y se sintetizan in situ *en una célula de hibridación* (izquierda). *Con cuatro de estas células pueden estudiarse más de 6500 genes humanos. Las fotos son cortesía de D. Lockhart, Affymetrix*

en etapas sucesivas gracias al cambio cíclico de la temperatura: disociación de las hebras complementarias de ADN, unión de los oligonucleótidos iniciadores y extensión de los mismos por acción enzimática.

Pero estas técnicas requieren sondas obtenidas por clonaje o bien conocer de antemano la secuencia precisa del ADN que posibilita el diseño de los oligonucleótidos iniciadores.

Para obviar tales limitaciones, a principios de los años noventa se desarrollaron tres técnicas de amplificación: RAPD, AP-PCR y DAF. Estas técnicas usan oligonucleótidos iniciadores de secuencia arbitraria, capaces de dirigir la síntesis enzimática *in vitro* de una multiplicidad de sitios de ADN; producen un grupo arbitrario de fragmentos de amplificación. Los fragmentos generan un perfil de bandas características cuando, sometidos a electroforesis en geles de poliacrilamida, se separan en razón de su tamaño. Los sitios iterados dependen de la secuencia de los oligonucleótidos iniciadores; siendo éstos arbitrarios, el sistema no requiere información genética previa.

Desde su invención, se han empleado estas huellas genéticas arbitrarias para clasificar animales, plantas y microorganismos, para inferir su relación evolutiva, levantar mapas genéticos, identificar marcadores de ADN vinculados a genes de interés y para estudiar la expresión genética del ARN. En tales marcadores se basó la investigación de corrientes migratorias y el parentesco en tortugas marinas del género *Caretta*, la propagación de la planta ornamental *Chrysanthemum* y la evaluación de variedades de hortalizas y pastos. En esas técnicas se fundó también la cartografía génica de organismos que se han convertido en arquetípicos de los distintos campos de investigación biológica: *Arabidopsis* en los vegetales, *Xiphophorus* en los vertebrados y el ratón en los mamíferos.

No obstante la potencia del análisis genético molecular, su uso se ha visto condicionado por el coste y las dificultades asociadas con la manipulación y separación electroforética de los ácidos nucleicos. De ahí el interés de un avance reciente. Me refiero a la hibridación selectiva miniaturizada y en paralelo de ácidos nucleicos.

En dicha hibridación, las preparaciones de ADN o ARN marcadas con fluorescencia se ponen en contacto con cientos o miles de pequeños fragmentos sintéticos de ADN, dispuestos sobre membranas de nylon o sobre vidrio, plástico o silicio. Estas células de hibridación descubren directamente y en poco tiempo la secuencia de determinadas regiones genéticas.

Con células de ADN que contienen de 65.000 a 136.000 oligonucleótidos se han analizado ya unas 16.000 bases de ADN mitocondrial humano y 70.000 bases correspondientes a un número limitado de genes de ratón. Los ensayos duran pocas horas. Se ha logrado, asimismo, el estudio simultáneo de más de 6500 genes humanos. Con células compuestas de un centenar de oligonucleótidos arbitrarios se analizaron fragmentos de multiplicación de ADN procedente de bacterias *Escherichia coli* pertenecientes al serogrupo O157:H7, causante de diarrea hemorrágica y síndrome hemolítico urémico en niños. Las sondas permitieron identificar 14 tipos bacterianos en el estudio epidemiológico de un grupo microbiano altamente uniforme, presumiblemente de origen clonal.

El proceso de hibridación aplicado a la caracterización de huellas genéticas arbitrarias o al estudio de la expresión de genes o de "circuitos" genéticos dependerá, en cada caso, del tamaño de los fragmentos sintéticos de ADN, de su secuencia y de las condiciones de hibridación (concentración de los fragmentos sintéticos y del ácido nucleico a analizar). Estos factores están también relacionados con la forma en que se detectan los episodios de hibridación positiva (fluorescencia, quimioluminiscencia, etc.). Aunque son muchas las dificultades que hay que vencer para convertir en rutinario el empleo de tales sondas, las técnicas de hibridación se generalizarán en el estudio diagnóstico de agentes infecciosos, la exploración preventiva de mutaciones genéticas causantes de enfermedad y en la mejora vegetal y animal.

GUSTAVO CAETANO-ANOLLÉS
Departamento OHLD,
Universidad de Tennessee,
Knoxville

La energía y el mercado de valores

Sector energético español

En España la banca no es ajena al sistema energético. No puede serlo con un endeudamiento de éste de 3,4 billones de pesetas. Es más, diríase que corren una suerte paralela. En algún banco industrial, por ejemplo el Bilbao Vizcaya (BBV), esa presencia es incluso primordial. De la naturaleza de las relaciones entre el sistema financiero y el energético se derivan tres grandes capítulos de ingresos o gastos, según la óptica del cliente o del proveedor: el margen de intermediación, las comisiones por servicios, básicamente de recibos, y los servicios de mercados de capitales.

En el sistema financiero español se ha producido y se sigue produciendo un estrechamiento de márgenes, sobre todo en el sector energético. Pero la implantación del nuevo modelo de recibo va a suponer una mayor apertura de un servicio que hasta ahora se prestaba en exclusiva desde el sistema financiero y puede tener una influencia más que notable en el conjunto de las relaciones financieras entre la banca y el sector. En el fondo de este proceso subyace el reconocimiento explícito de la calidad de riesgo del sector energético, amén de constituir, por sus dimensiones, un campo natural para la competitividad entre agentes financieros.

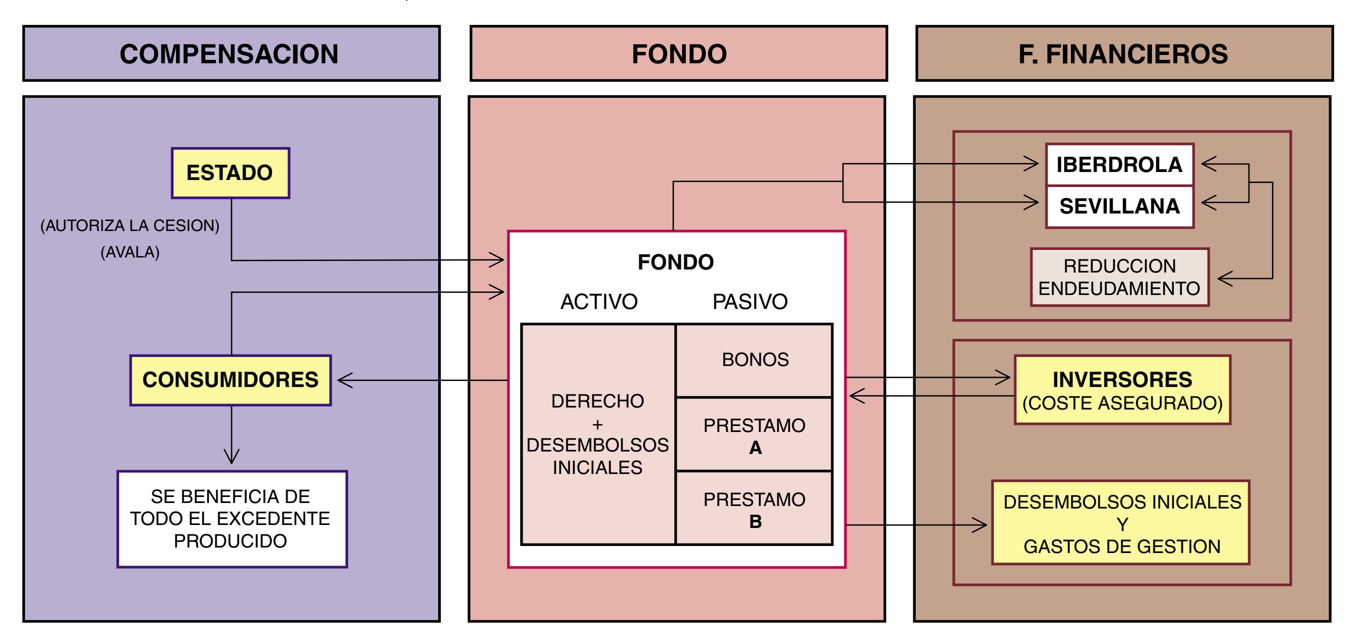
El sector energético constituye un factor de innovación financiera permanente, por su propia dimensión, el riesgo que entraña y la peculiaridad de su gestión. Aunque esa idea merece matizarse. Si hace siete años nos hubieran preguntado cuál sería, a 7 años vista, el peso relativo de la financiación en pesetas dentro del pasivo del sector, hacia donde iba a evolucionar aquel 42 %, muchos expertos se hubieran equivocado y no hubieran dicho que al 43 % que es ahora; es decir, no hubieran esperado que, en peso relativo, la financiación en moneda nacional estuviera como estaba antes.

Durante estos años hemos visto movimientos más lentos de lo presumible. Hay que destacar, sobre todo, la presencia ya consolidada de los pagarés como elemento de financiación, así como el menor peso de las obligaciones (en parte como consecuencia de la paulatina desaparición de las ventajas fiscales para el suscriptor).

Por otra parte, el endeudamiento en divisa puede acarrear riesgos considerables difíciles de compensar con otros ingresos del mismo carácter, dada la estructura básicamente nacional del resto de las partidas de pérdidas y ganancias del sector. ¿Hacia dónde van los cambios? Dos pistas nos señalan el camino. En primer lugar, los proyectos compartidos, ya sea en subsectores, ya sea en mercados geográficos o en ambos simultáneamente. En segundo lugar, la globalización de los mercados financieros que implica competitividad, titulización, riesgos de proyecto y un largo etcétera.

Un ejemplo práctico de innovación financiera en la gestión bancaria del sector energético se nos ha presentado a raíz de la moratoria nuclear vigente en España. Había que reducir la deuda contraída por las compañías eléctricas en sus inversiones en centrales. Dos eran las cuestiones fundamentales que se plantearon. La primera se desdoblaba a su vez: *a*) que cada una de las empresas energéticas que habían invertido en las centrales nucleares vendiesen separadamente sus trozos de inversiones o los titulizasen (operación que consiste en la agrupación en un solo paquete de un conjunto de préstamos, de los que el prestamista vende partes alicuotas de la propiedad de dicho paquete). Los nuevos inversores percibirían a cambio lo que les correspondiese del máximo del 3,54 %. Este porcentaje es el máximo que se puede llegar a cargar en el recibo de la luz, como parte de la tarifa, para financiar la moratoria nuclear. O *b*), que las inversiones realizadas por las empresas energéticas se agregasen en un único fondo y que obtuviesen la financiación de las entidades bancarias.

La segunda cuestión fundamental era que, en el caso de decidirse por la constitución del fondo, se tendría que escoger entre una financiación genérica, con unas mismas condiciones de vencimiento, amortización y tipo



de interés a pagar, o estructurada con tramos de financiación preferente, lo que permitiría obtener mejores condiciones para cada tramo y un menor coste financiero conjunto.

Se optó por la creación del fondo con financiación a tramos a través de los bonos, los llamados préstamo A y préstamo B. Las condiciones financieras que se pacten en cada uno de éstos quedan recogidas en real decreto.

Respecto a la influencia de la evolución de los tipos de interés en la cotización de las compañías del sector, existe el estereotipo de que las acciones son más sensibles, en su cotización, a los tipos de interés que al mercado en general. Estereotipo que, aunque cierto en el caso español, no puede generalizarse, como nos lo demuestra el mercado alemán o el sueco. En nuestro caso, al existir esa fuerte correlación, las expectativas del sector son buenas. Otro lugar común que existe es que el porcentaje del beneficio que las empresas reparten como dividendo es muy alto y en ello depende, en parte importante, su cotización. Pero esto debe matizarse. La banda de cotización de las acciones en la Bolsa española es, porcentualmente, más bajo que el conjunto del sistema, del orden de 10 puntos. Si bien no debe olvidarse que "la expectativa de mejores resultados es la mejor de las retribuciones para el accionista".

José María Abril
Banco Bilbao Vizcaya

Compresión óptica

Más allá del límite cuántico

En un célebre artículo publicado en 1927, Werner Heisenberg mostró una de las consecuencias más notables de la teoría cuántica: el principio de incertidumbre o indeterminación. Según este principio —del que a menudo se extraen conclusiones filosóficas que caen fuera de su contenido estricto— es imposible determinar simultáneamente la velocidad y la posición de una partícula. Esta imposibilidad no es sólo un límite en la precisión experimental con que puede realizarse una medición, sino que constituye, además, una propiedad intrínseca. Es decir, no existe una descripción coherente del estado de una partícula en la que velocidad y posición sean atributos que puedan asignarse a una partícula con precisión arbitraria. El enunciado formal de dicho principio indica que el producto de las incertidumbres no puede ser menor que una magnitud fundamental: la constante de Planck.

El péndulo, o más concretamente un niño sentado en un columpio, sirve de ejemplo para imaginarse la curiosa dinámica implicada en el principio de incertidumbre. Mientras el niño permanece en reposo en el punto de equilibrio, tanto su velocidad como su posición están bien determinadas. Si se contrae el sistema formado por el niño y el columpio hasta convertirlo en partículas microscópicas, el principio de indeterminación comienza a hacerse evidente y tanto la posición como la velocidad del niño se vuelven inciertas.

El concepto de posición debe entonces sustituirse por el de nube de probabilidad alrededor del punto de equilibrio. Los puntos más densos de la nube son puntos en los que la probabilidad de encontrar a la partícula es mayor. El tamaño de la nube corresponde a la incertidumbre en la posición de la partícula y es mayor cuanto mayor sea la longitud del péndulo. Con esta incertidumbre se asocia la expresión "ruido cuántico".

Por su parte, los valores de la velocidad también están indeterminados. En el ejemplo del péndulo ambas incertidumbres (velocidad y posición debidamente normalizadas) son las mismas, situación que se conoce como "límite cuántico". Por fortuna (y para tranquilidad de niños y de padres en los parques) la constante de Planck es una magnitud pequeña y el ruido cuántico es imperceptible en el mundo macroscópico.

El principio de indeterminación, originariamente enunciado para velocidad y posición, extiende su aplicación a otros pares de magnitudes físicas. Adquiere su interés en la descripción cuántica de la luz, donde los campos eléctricos y magnéticos ondulatorios desempeñan funciones análogas a la posición y a la velocidad, con una descripción matemática idéntica a la del péndulo. La consecuencia, entonces, es que hay también un ruido cuántico en la luz.

En 1985, Richard Slusher y colaboradores, de los laboratorios AT&T Bell, produjeron luz para la que el ruido cuántico en una de las variables está por debajo del límite cuántico, generando lo que luego se llamó "compresión" (*squeezing)*. Este fenómeno representa un compromiso en el que el ruido de una variable se reduce a expensas del ruido de la otra bajo el dictamen del principio de incertidumbre. Lo interesante de la "compresión" de la luz es que, al controlar el ruido, se presenta la posibilidad de mejorar la calidad de comunicaciones ópticas y la de los métodos de medición de las ondas de gravedad.

La producción de "compresión" en otros sistemas físicos se ha extendido a sistemas sólidos, donde las oscilaciones de los átomos —llamadas fonones"— alrededor de la posición de equilibrio pueden asimilarse a las del niño balanceándose en el columpio.

Un grupo de la Universidad de Michigan llevó a cabo experimentos de óptica ultrarrápida, que consistieron en arrojar pulsos de luz sobre un sólido. Para ciertos materiales (tantalato de potasio en el experimento en cuestión) el pulso actúa de manera tal que produce un cambio súbito en la frecuencia de oscilación, como si la longitud de la cadena que sostiene el columpio se alterase para volver a su longitud original después del paso del pulso. El autor hizo la observación teórica de que en realidad este estado es una versión de la "compresión" aplicada a las vibraciones de los átomos en el sólido. El resultado fue un trabajo conjunto firmado por G. A. Garret, A. G. Rojo, A. K. Sood, J. F. Whitaker y R. Merlin, y publicado en *Science*. El ruido en la posición del átomo queda oscilando en el tiempo: la nube cambia de tamaño de manera periódica y durante la mitad del ciclo la incertidumbre está por debajo del límite cuántico. Esta oscilación la detecta un segundo pulso, de menor intensidad, cuyo coeficiente de transmisión oscila en una cuantía que es función de la diferencia de tiempo entre los dos pulsos, lo que constituye una medición indirecta de la "compresión".

El trabajo recibió comentarios muy favorables de la comunidad óptica y de estado sólido, puesto que es la primera vez que se controla el ruido atómico en sistemas sólidos, hasta llevarlo —por ciertas fracciones de tiempo— debajo del límite cuántico.

Las posibles aplicaciones de este nuevo fenómeno de la "compresión" de fonones no son evidentes y por el momento su importancia está circunscrita a la ciencia básica.

Alberto G. Rojo
Universidad de Michigan

Nuevos fármacos

Actividad antimicrobiana de Arthrinium

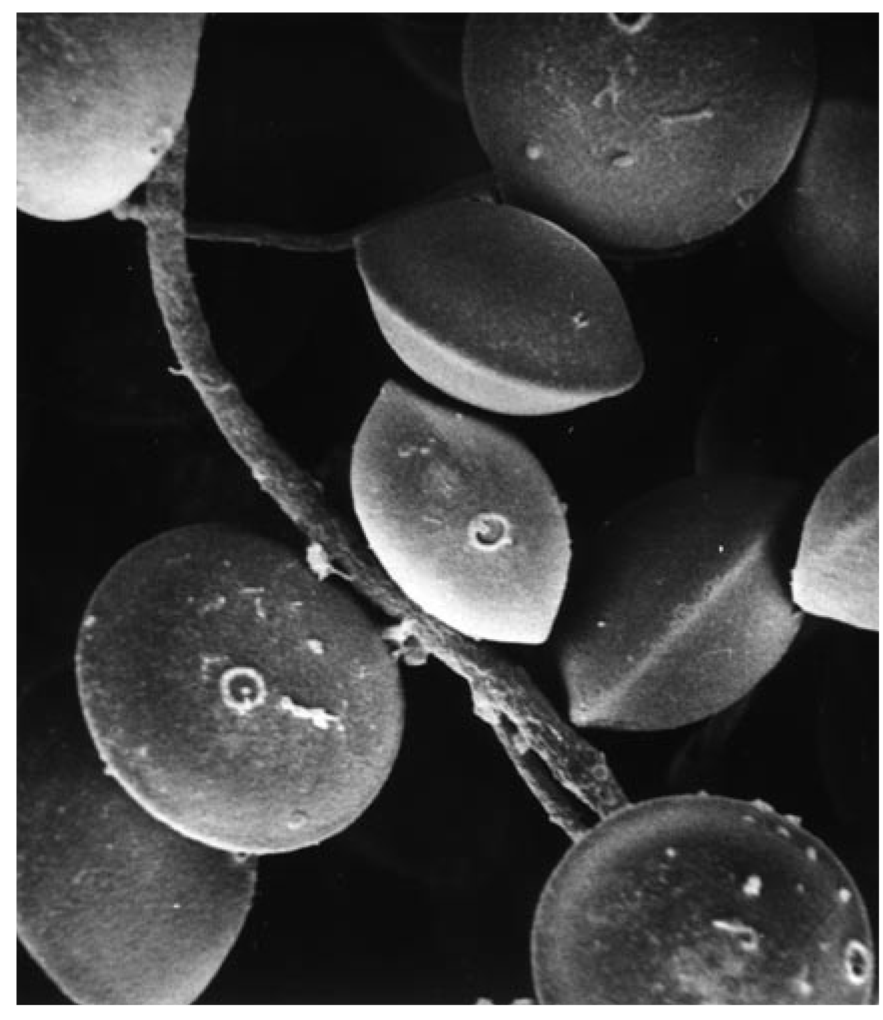
El empleo y administración de antibióticos y antifúngicos de forma indiscriminada ha multiplicado el número de cepas patógenas resistentes a los mismos. La búsqueda de nuevos compuestos de interés farmacológico que sean cabeza de serie se ha convertido en una tarea prioritaria de investigación. El lugar donde centrar dicha búsqueda es, sin duda, en la naturaleza y, en particular, el metabolismo de los hongos filamentosos. Entre éstos cabe citar al género *Arthrinium*.

El género *Arthrinium* fue propuesto el año 1817 por Kunze, en su obra *Mycologische Hefte*. En 1976, M. B. Ellis acometió la revisión exhaustiva del género, que hemos completado recientemente aprovechando la investigación experimental que se viene realizando en nuestro departamento desde 1988.

Se reconocen ahora 28 especies del género *Arthrinium*, cinco de las cuales las hemos descrito en nuestro laboratorio: *aureum*, *serenensis*, *marii*, *mediterranii* y *hispanicus*. Otras cuatro más están pendientes de publicación.

Las características microscópicas del género se pueden resumir en las siguientes: conidios holoblásticos formados a partir de conidióforos de origen basauxico y provistos del típico anillo saturniano. Además de determinar esas características ultraestructurales del género, hemos aportado la descripción de algunas estructuras: los cuerpos de Woronin en conidios, los sistemas de membranas concéntricas o la presencia de partículas semejantes a virus en hifas y conidios, estructuras poco frecuentes en otros géneros

Los metabolitos secundarios sintetizados por cepas del género *Arthrinium* se encuadran fundamentalmente en la familia de las papulacandinas, sustan-



Arthrinium aureum

cias anfófilas que contienen residuos de azúcares y dos cadenas de ácidos grasos insaturados.

Para establecer el modelo de crecimiento de las cepas bajo diferentes condiciones ambientales, nos sirve de ayuda el análisis de imágenes asistido por ordenador a tiempo real. El desarrollo de las cepas en medios diversos permite maximizar la producción de los metabolitos, ya que la síntesis de antibióticos acostumbra concentrarse en determinadas etapas del ciclo vital de los microorganismos.

En nuestro laboratorio, hemos investigado un total de 46 cepas de diversas especies del género, aisladas de diferentes sustratos. La mayoría de las cepas han demostrado una notable capacidad antibiótica, compatible con la elaboración de papulacandinas. Se hallan en fase de purificación e identificación.

Las cepas que mostraron ser altamente productoras de sustancias inhibidoras se han trasferido a cultivo en biorreactor, equipado de sistema de control de *p*H, nivel de oxigenación de la muestra, adición de medio de cultivo, temperatura y nivel de espuma formado.

El cultivo en fermentador ha permitido conocer en forma continua y con mayor precisión la productividad, tipo y capacidad inhibidora de los metabolitos fabricados por las cepas en estudio y formular un nuevo modelo de crecimiento-productividad. Asimismo, se ha podido precisar el grado de actividad de los metabolitos sobre un amplio grupo de bacterias y de hongos filamentosos y levaduras.

Los metabolitos elaborados y acumulados por las cepas aisladas de nuestro entorno, dado su mayor espectro de actividad, pueden considerarse un acervo prometedor para el tratamiento de procesos de origen fúngico y bacteriano. Se ha corroborado su capacidad inhibidora frente a bacterias, entre las que destacan por su interés patógeno especies causantes de procesos respiratorios (*Klebsiella pneumoniae*), intestinales (*Escherichia coli, Salmonella* sp.), afecciones ópticas (*Pseudomonas aeruginosa*) e intoxicaciones en el hombre (*Staphylococcus aureus*).

Algunos metabolitos poseen actividad antifúngica frente a levaduras de interés en clínica como *Candida albicans* y frente a *Aspergillus niger* y *Trichophyton mentagrophytes*, entre los hongos miceliares. Estos hongos son agentes causales de procesos de otomicosis, dermatomicosis o de micosis por oportunistas.

La consecución de los objetivos planteados nos permite llevar a cabo la realización de pruebas toxicológicas y mutagénicas con el fin de determinar si estos nuevos productos pueden ser utilizados como antibióticos.

M. A. Calvo Torras,
M. Agut Bonsfills,
R. M. Calvo Torras
y J. Larrondo Veliz
Depto. de Patología y Producción Animal. Facultad de Veterinaria. Universidad Autónoma de Barcelona

Estructura de proteínas

El dominio CH

La célula está delimitada por una membrana, bajo la cual existe un ensamblaje proteico en forma de red, llamado esqueleto de membrana. Ese entramado dota de flexibilidad y resistencia al citoplasma periférico de las células.

Uno de los componentes principales del esqueleto de la membrana es la espectrina, una proteína alargada que entrecruza filamentos de actina y conecta el citoesqueleto a la membrana celular. La forma funcional de la espectrina es un tetrámero, es decir, está constituida por cuatro cadenas polipeptídicas. Tiene una longitud de 200 nanómetros.

En las subunidades se pueden distinguir una serie de segmentos repetidos, que aportan flexibilidad, y otros segmentos, que sirven a la espectrina para interaccionar con otras proteínas o con la membrana plasmática.

La región de unión a actina se localiza en un extremo de la cadena β. Dada la organización antiparalela del tetrámero de espectrina, éste es capaz de entrecruzar dos filamentos de actina. La región de unión a actina en la espectrina es homóloga (su secuencia de aminoácidos se parece) a la de otras proteínas que entrecruzan actina: α-actinina, distrofina, ABP-120, etc. Hay enfermedades genéticas —la distrofia muscular de Duchenne, por ejemplo— que guardan relación con defectos en algunas de estas proteínas.

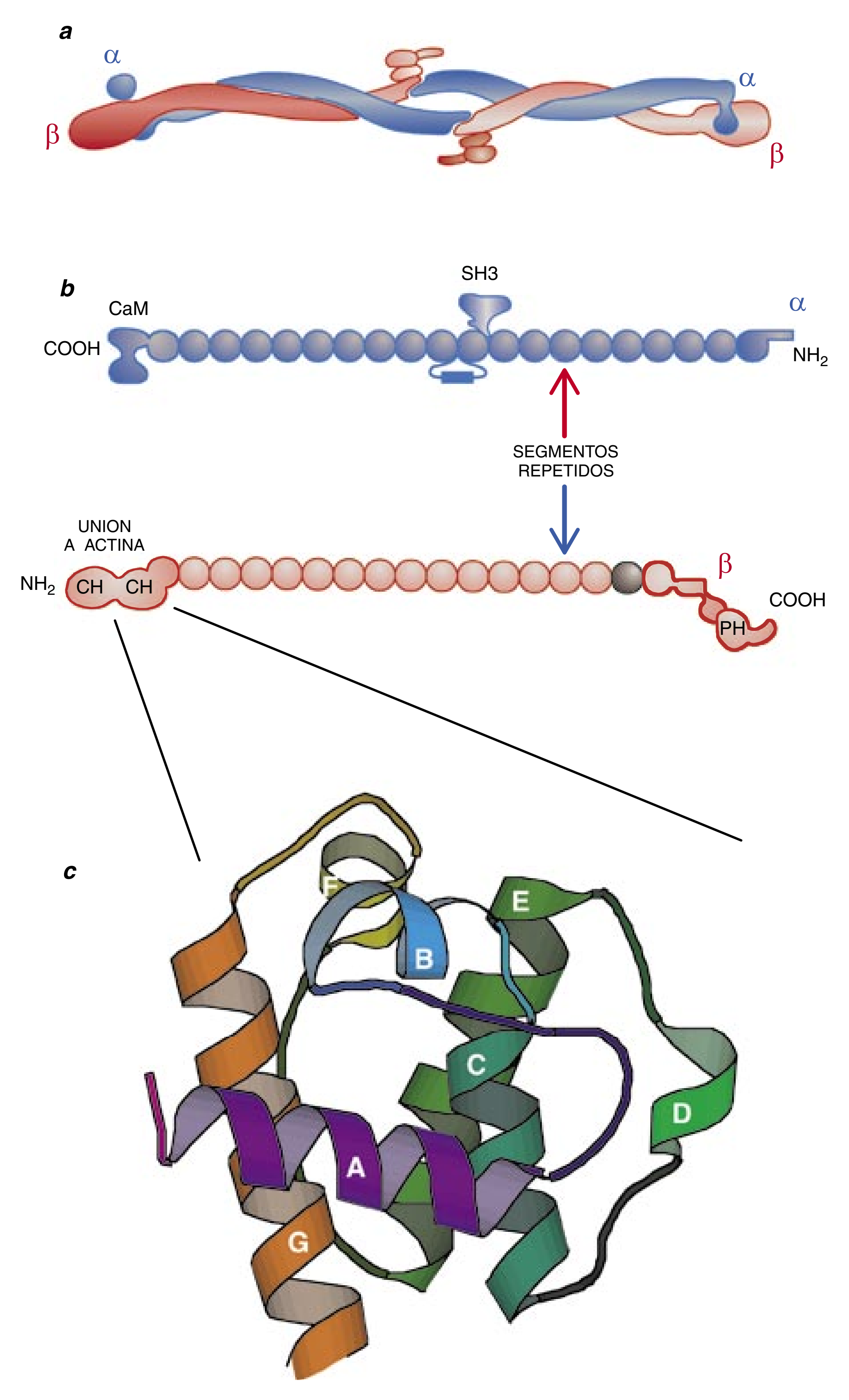
El análisis de la secuencia de la región de unión a actina, así como investigaciones por microscopía electrónica revelaron que dicha región consta de dos dominios homólogos de alrededor de 110 aminoácidos. Estos dominios se denominaron CH (de "homología a calponina") por la similitud de su secuencia con la calponina, una proteína reguladora de la contracción muscular.

Una forma de abordar el estudio estructural y funcional de proteínas grandes y complejas como la espectrina, es analizar por separado los dominios o módulos que las constituyen. Los dominios son unidades estructurales que normalmente tienen una función biológica definida y se pliegan de forma autónoma. Un mismo dominio puede encontrarse en proteínas que desempeñan funciones diferentes, lo que refleja que algunas proteínas han evolucionado combinando "bloques de construcción" que ya existían en otras. Por lo que se refiere al dominio CH, no sólo se encuentra en proteínas del citoesqueleto, sino que existe también en proteínas encargadas de transmitir señales en las células. La ausencia de parte del dominio CH en una de estas proteínas, Vav, se correlaciona con la capacidad de generar tumores en algunas células.

Nuestro grupo está llevando a cabo una caracterización estructural y funcional de diversos dominios de la espectrina. El conocer la estructura de una proteína o de un dominio, es decir, la conformación que adopta su cadena polipeptídica en el espacio, nos ayuda a comprender su función biológica. Recientemente hemos resuelto la estructura tridimensional de uno de los dominios CH de la espectrina mediante cristalografía de rayos X. Se trata de una técnica muy poderosa para el estudio de la estructura de proteínas, ya que permite conocer la estructura de una molécula a partir de la forma en que un cristal formado por muchas de esas moléculas difracta los rayos X.

El segundo dominio CH de la β-espectrina humana se obtuvo a través de procedimientos habituales en genética molecular: la clonación y posterior expresión del fragmento correspondiente en la bacteria *Escherichia coli*.

Los cristales difractan los rayos X, generando un conjunto de puntos conocido como patrón de difracción. Cada proteína presenta un patrón de difracción característico, que está relacionado con su estructura cristalina mediante una operación matemática



Se ha resuelto la estructura tridimensional de un dominio CH de la espectrina, una proteína del citoesqueleto. En (a) *se representa un esquema de la espectrina, formada por cuatro cadenas polipeptídicas, mientras que en* (b) *se muestra solamente uno de los dímeros α/β, ilustrando la organización de dominios. PH significa "homología a pleckstrina", SH3 "homología a Src", CaM similar a calmodulina. Por último,* (c) *muestra la arquitectura molecular del dominio CH ("homología a calponina"). La cadena polipeptídica aparece representada como una cinta, cuyo color varía del violeta, en el extremo N-terminal, al rojo, C-terminal. Las α-hélices se han designado como A-G*

(la transformada de Fourier). Sin embargo, debido a que los rayos X no se pueden enfocar, parte de la información se pierde, lo que impide obtener directamente la estructura de la proteína. Esto se conoce como "problema de la fase", y resolverlo supone algo así como "recuperar el enfoque". En el caso del dominio CH, el "problema de la fase" se resolvió por sustitución isomórfica múltiple (MIR); este método consiste en comparar los datos de difracción de cristales de la proteína con los de la proteína unida a metales pesados. Combinando estos datos, se obtiene un "mapa de densidad electrónica" que permite construir un modelo atómico de la proteína. La resolución de la estructura del dominio CH es de 2Å (se pueden distinguir dos átomos separados entre sí por 2×10^{-10} m).

La conformación mayoritaria que adopta la cadena polipeptídica en el dominio CH es helicoidal, un tipo de estructura secundaria muy frecuente en proteínas. Consta de cuatro α-hélices principales y otras tres más cortas, conectadas por regiones de estructura menos regular. Como es común en las proteínas, en el interior se encuentran aminoácidos de carácter químico más hidrofóbico, que son importantes para estabilizar la arquitectura del dominio. Podemos considerar la estructura tridimensional de este dominio como un prototipo de otros dominios CH, ya que normalmente se asume que la homología de secuencia entre proteínas refleja una homología de estructura.

Se ha propuesto que el dominio CH sirve a las proteínas que lo contienen para interaccionar con filamentos de actina. De acuerdo con estudios anteriores sobre proteínas de la familia de espectrina, se hallaría directamente implicada en la interacción una zona que incluye aminoácidos del final del primer dominio CH y del principio del segundo dominio CH. Hay datos que indican que este último dominio participa en la unión y refuerza la afinidad del primer dominio CH. También es probable que el segundo dominio esté implicado en la regulación de la interacción con actina y en la estabilización del dímero α/β de espectrina.

La estrategia de estudiar dominios de proteínas comporta una simplificación: suponer que un dominio aislado tiene la misma estructura y actividad que cuando forma parte de la proteína entera. Pese a dicha limitación, está aportando mucha información

sobre las proteínas multimodulares Una forma de integrar los resultados obtenidos sería estudiar fragmentos de estas proteínas que consten de varios dominios.

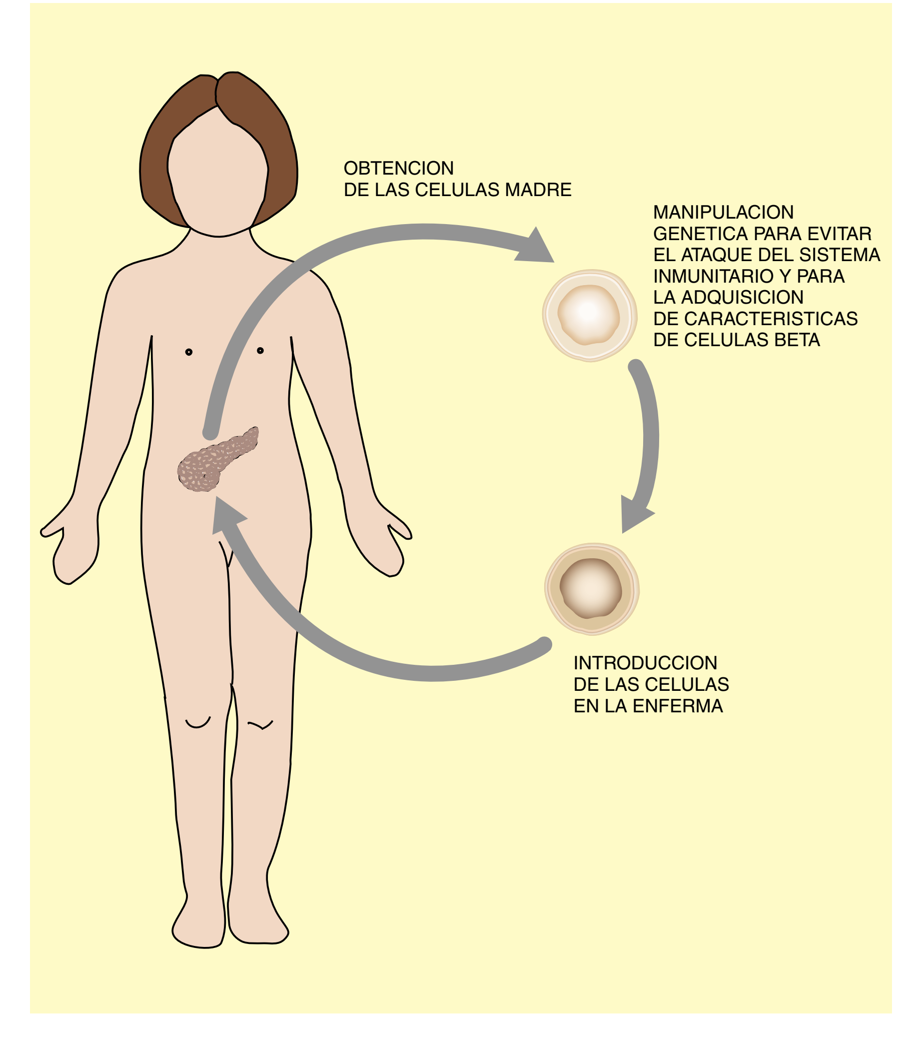
SONIA BAÑUELOS,
KRISTINA DJINOVIÇ-CARUGO
y MATTI SARASTE.
Laboratorio Europeo
de Biología Molecular,
Heidelberg

Diabetes

Genética y terapia

La diabetes mellitus es una enfermedad de naturaleza heterogénea cuyo común denominador son los niveles persistentemente elevados de glucosa en sangre. A la larga esa alteración trae complicaciones microvasculares y neurológicas. Existen dos formas de diabetes mellitus: la dependiente de insulina, o tipo I, y la no dependiente de insulina, o tipo II. Ambas enfermedades presentan heterogeneidad genética y clínica.

La no dependiente de insulina (DMNID) es la forma más común de diabetes. Nueve de cada diez diabéticos son de tipo II. Se trata de una enfermedad heterogénea en la que las células productoras de insulina de los islotes de Langerhans (células beta) presentan una alteración funcional o bien existe un defecto en la acción de la insulina que secretan. Para el control de esta enfermedad puede bastar la dieta y el ejercicio, en los casos poco complicados. Sin embargo, hay pacientes que necesitan drogas que estimulen las células beta o que refuercen la acción de la insulina. Algunos enfermos pueden evolucionar hacia una forma más grave y necesitar administración de insulina exógena.



La diabetes insulin-dependiente (DMID) es una enfermedad autoinmunitaria. Aparece tras la infiltración del páncreas por linfocitos *T* citotóxicos, que en este caso lisan las células beta. No se conoce la causa de la diabetes de tipo I, aunque se admite una clara predisposición genética y una posible implicación de factores ambientales (infecciosos o químicos). En la predisposición genética a la diabetes de tipo I se han identificado más de 10 genes implicados.

Los pacientes de diabetes tipo I dependen de por vida de la administración de insulina exógena. De ahí el apremio por hallar soluciones definitivas que restituyan la funcionalidad de las células beta productoras de la hormona. Los esfuerzos en esta dirección se han centrado en la obtención de algún tipo celular que, implantado en el enfermo, sustituya de manera eficaz y permanente la función de las células beta pancreáticas. La célula ideal sería aquella que, desempeñando idéntica función que la célula beta original, escapase al ataque del sistema inmunitario. Para este fin hay dos estrategias posibles: la manipulación de células beta para hacerlas resistentes al ataque del sistema inmunitario y la transformación de células de otro tipo, no reconocidas como células beta por el sistema inmunitario, para que produzcan insulina de la forma más fisiológica posible.

Los métodos empleados hasta el momento han resultado insuficientes. El enfoque más sencillo —el trasplante de células beta procedentes de donantes o de origen animal (xenotrasplante)— no representa una solución por una poderosa razón: el sistema inmunitario reconoce a tales células como extrañas y las destruye, daño que puede extenderse si el sistema de histocompatabilidad (HLA) del donante difiere del HLA del receptor.

Se ha ensayado también con la inmortalización de células beta mediante la expresión por manipulación genética del antígeno *T* del virus SV40. Sin embargo, estas células presentan una acusada tendencia a la desdiferenciación, a la regresión a estados más simples; así, dejan muy pronto de responder a los niveles de glucosa con la producción de insulina.

La introducción del gen de la insulina en células no-beta tampoco ha supuesto una solución, debido a un doble motivo: la expresión de insulina se produce a muy ba-

jos niveles y la carencia en células no-beta de las enzimas requeridas para el correcto procesamiento de la proteína inmadura. Además, una célula manipulada no responde a la concentración fisiológica de glucosa como lo haría una célula beta, lo que acarrea problemas de control del azúcar necesaria en sangre.

Aunque los resultados obtenidos hasta el momento no son satisfactorios, las nuevas técnicas que permiten la modificación a voluntad de las características genéticas de células y organismos, así como recientes avances en el conocimiento del desarrollo de las células beta y en la etiología de algunos de los síndromes autoinmunitarios, sugieren vías a través de las cuales podrían obtenerse los resultados deseados.

El páncreas endocrino tiene un origen endodérmico. Deriva del intestino de embriones de unos 20 somitos. La investigación reciente en el ratón ha identificado genes que codifican factores de transcripción —proteínas— que controlan el desarrollo y diferenciación de los distintos linajes endocrinos del páncreas. El factor PDX1 interviene en la especificación de las células endocrinas; el factor Pax6 se requiere para el desarrollo específico de las células α, productoras de glucagón, y el factor Pax4 para la determinación de las células β y los demás linajes endocrinos pancreáticos.

Se supone que en el adulto las células beta que van perdiéndose se regeneran a partir de una población de células madre o precursoras ("stem") situadas en el árbol de conductos pancreáticos. La expresión forzada de los nuevos factores identificados en células madre de origen pancreático, o incluso de otro origen, podría dirigir su diferenciación en células de tipo beta-pancreáticas. Ello abriría la posibilidad de una fuente ilimitada de células beta producidas *in vitro*. Si se lograra, supondría un progreso fundamental, ya que podrían modificarse genéticamente las células antes de su introducción en el paciente para evitar el ataque del sistema inmunitario.

Un avance de lo que podría ser la futura terapia se ha producido recientemente con ratones. A partir de una cepa de múridos diabéticos no obesos (NOD), se han generado ratones transgénicos en los que se introdujo el gen de la insulina de forma tal que se expresara en células productoras de proopiomelanocortina (en pituitaria). Estas células fabrican grandes cantidades de insulina madura y no se ven atacadas por el sistema inmunitario, pues carecen del perfil inmunitario de las células beta. El trasplante de pequeñas cantidades de los tejidos transgénicos en los ratones diabéticos resultó en la restauración de la normoglucemia y la reversión completa de los síntomas de diabetes.

Sin embargo, aquellos casos en que el sistema inmunitario reaccione contra elementos esenciales del mecanismo de detección de glucosa, o de producción de insulina en las células beta, serán previsiblemente resistentes a esta terapia. Es evidente que, si desencadena una reacción contra la propia insulina, se eliminará cualquier célula que la exprese. Así parece ocurrir con ciertas formas de la enfermedad que se asocian con el gen de la insulina localizado en el brazo corto del cromosoma 11.

Delante del promotor del gen de la insulina hay una región de ADN satélite con repeticiones de 14 pares de bases, cuyo grado de expansión se asocia con distinta susceptibilidad a la enfermedad. Recientemente se ha demostrado que los alelos de clase III, que confieren resistencia dominante a la diabetes, presentan una mayor expresión de insulina en timo que los alelos de clase I, asociados con susceptibilidad a la enfermedad. Estos resultados se interpretan como una mayor eficacia en la selección negativa de células *T* reactivas contra la insulina por su mayor expresión en timo.

En concordancia con tales observaciones, la sobreexpresión de la insulina en el timo de ratones transgénicos diabéticos suprime los síntomas de la enfermedad. Este descubrimiento sugiere que una posible solución sería la sobreexpresión de la insulina en timo mediante terapia génica. Otra posibilidad, en este y en otros casos en que la reacción del sistema inmunitario se presente frente a componentes esenciales de la producción de insulina, sería la introducción de las células beta a trasplantar en microcápsulas que no representen una barrera para nutrientes e insulina, pero sí para los linfocitos *T* citotóxicos.

MIGUEL TORRES
y ANTONIO SERRANO
Centro Nacional de Biotecnología,
CSIC,
Madrid

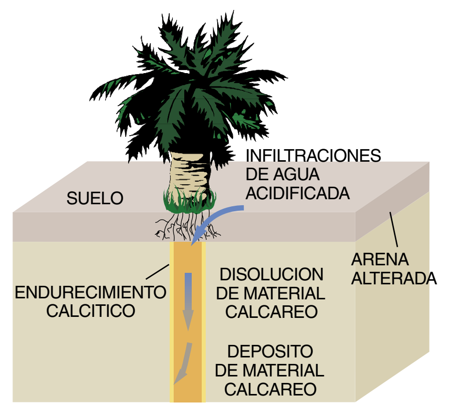
De cerca

Roland Paskoff

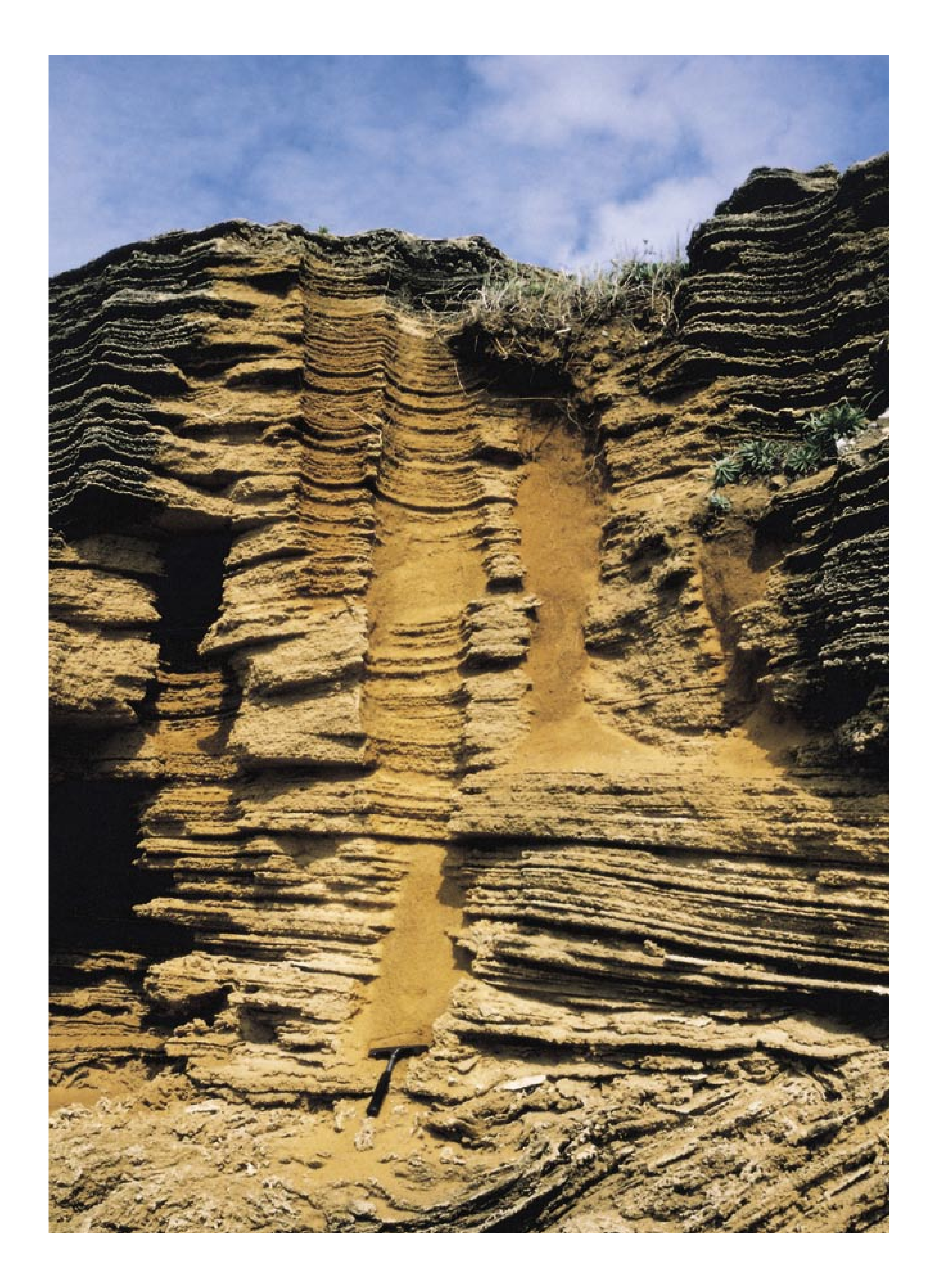
Chimeneas de arena

En los alrededores de Tabarka, en el noroeste de Túnez, besa el mar los acantilados que ha ido tallando en las dunas litorales. Las dunas, traídas por el viento, y formadas hace unos 30.000 años, fueron más tarde consolidadas por un cemento calcáreo. Hállanse perforadas por un gran número de chimeneas, cilindros verticales de notable regularidad. El diámetro medio de estas perforaciones es de una treintena de centímetros; y su profundidad es, con frecuencia, más de un metro (el martillo de las fotografías tiene unos 30 centímetros). Las paredes de la chimenea, rellenas de arena roja, se encuentran tapizadas por un endurecimiento calcítico de algunos centímetros de espesor (*las flechas de la fotografía al pie).*

¿Cómo se han originado estas chimeneas? La explicación más corriente ve en ellas la huella, el "vaciado", de troncos de árboles —palmeras, por ejemplo— hundidos bajo las arenas de los médanos; la posterior consolidación de las arenas habría conservado estas huellas tras la descomposición de los vegetales. Sin embargo, la presencia de árboles progresivamente engullidos por las arenas hubiera perturbado la estratigrafía, lo que no es el caso. Además, el color de la arena que llena las chimeneas sigue estando por explicar, y se ha dejado de lado, también, que los árboles no crecen rigurosamente verticales, sino un poco inclinados.



Los árboles se encuentran en el origen de estas chimeneas, pero no en su interior, sino en la superficie de las antiguas dunas después de su consolidación. En efecto: la alteración climática de la superficie de las dunas creó un suelo donde crecieron árboles. El agua de lluvia, acidificada por la presencia de árboles longevos y de tronco grueso, disolvió el cemento calcáreo situado al pie de los troncos (*véase el esquema*). Las chimeneas formadas de este modo se rellenaron después con los productos de erosión del suelo, enrojecidos, a su vez, por la oxidación de minerales ferruginosos presentes en la superficie.



Computación cuántica con moléculas

Gracias a la resonancia magnética nuclear, las moléculas de ciertos líquidos se convierten en un computador extraordinario

Neil Gershenfeld e Isaac L. Chuang

En descomponer en primos un número de 400 dígitos —un desafío aritmético necesario para descerrajar algunos códigos de seguridad— tardarían miles de millones de años nuestros supercomputadores más veloces. Pero un tipo de ordenador de invención reciente, fundado en interacciones mecanico-cuánticas, podría ejecutar la tarea en un año, arruinando con ello la mayoría de los sistemas criptográficos, por complejos y refinados que sean. Pero no hay que preocuparse por la información reservada, pues nadie ha conseguido construir un computador cuántico operativo. Lo que sí ha quedado demostrada es la viabilidad de ese camino. El ordenador de marras, que no se parecería en nada al de nuestra mesa de trabajo, pudiera confundirse muy bien con la taza de café que solemos dejar al lado.

Igual que otros autores, nosotros creemos que llegará el día en que los computadores cuánticos, fundados en las moléculas de un líquido, venzan las dificultades que atenazan a los ordenadores clásicos. Los principales obstáculos que se interpondrán en el avance de los ordenadores actuales tendrán que ver con los límites físicos de la miniaturización (ni los transistores ni las conexiones eléctricas pueden hacerse más delgados que el diámetro de un átomo). O tal vez vengan determinados por razones prácticas: será costosísima la fabricación de microcircuitos más potentes. Sin embargo, las posibilidades mágicas de la mecánica cuántica encierran quizá la clave de resolución de ambos problemas.

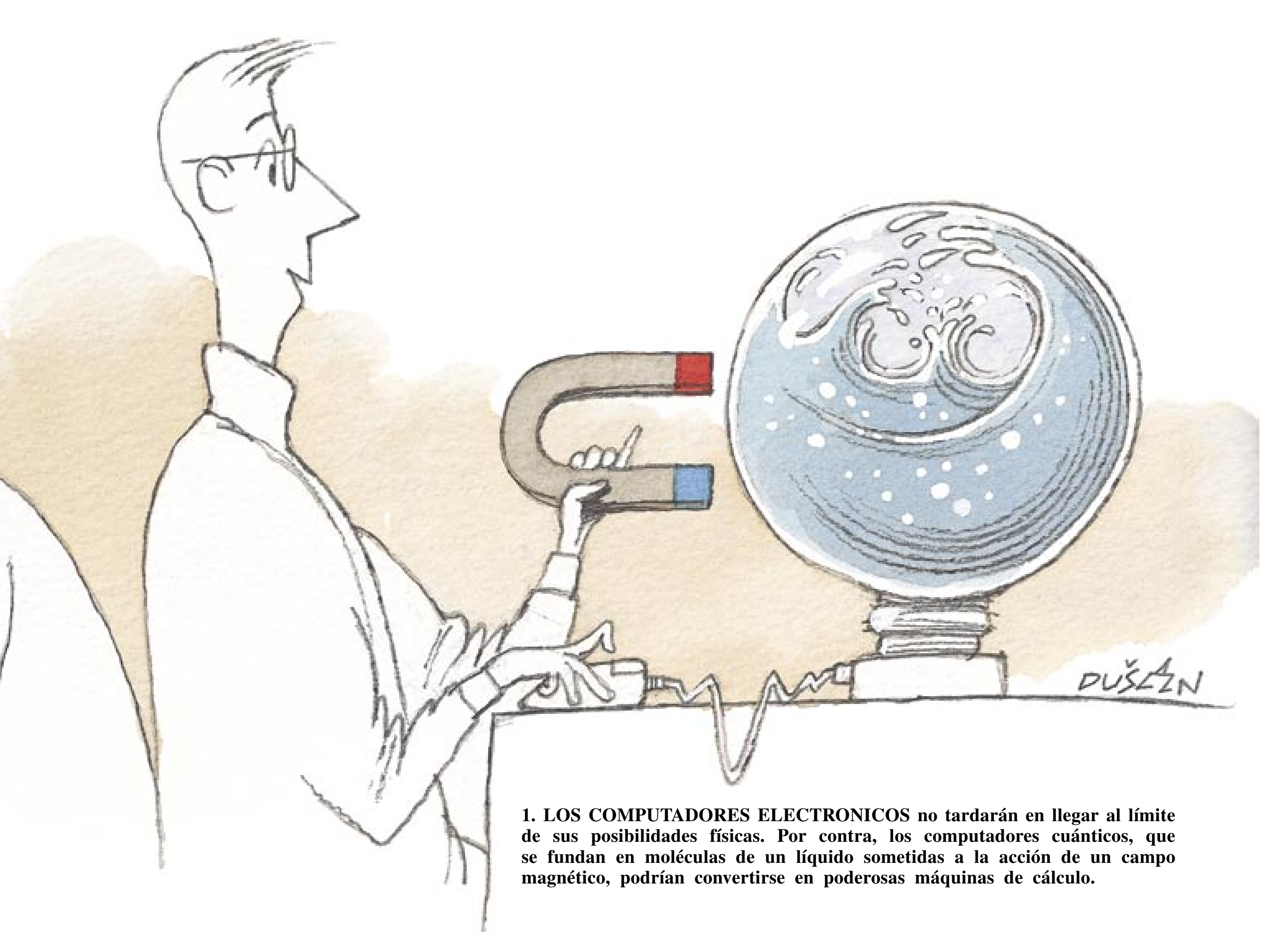
La ventaja de los ordenadores cuánticos reside en la forma en que codifican un bit, la unidad fundamental de información. En un ordenador digital clásico, el estado de un bit queda especificado mediante un número, 0 o 1. En consecuencia, para describir una palabra binaria de n bits se recurre a una cadena de n ceros y unos. Un bit cuántico, un qubit, podría representarse mediante un átomo en uno u otro de dos estados diferentes, designables por 0 y 1. Dos qubits, lo mismo que dos bits clásicos, pueden alcanzar cuatro estados distintos y bien definidos: 0 y 0, 0 y 1, 1 y 0 o 1 y 1.

A diferencia de los bits clásicos, sin embargo, los qubits pueden existir a la vez siendo 0 y 1; la probabilidad de cada estado viene dada por un coeficiente numérico. Para describir un ordenador cuántico de dos qubits habrá que emplear, por tanto, cuatro coeficientes. En general, n qubits requieren $2n$ números, lo que muy pronto se convierte en un conjunto considerable para valores mayores de n. En efecto, con n igual a 50, se requieren unos 10^{15} números para describir las probabilidades de todos los posibles estados de la máquina cuántica: una cifra que excede la capacidad del mayor ordenador clásico. El ordenador cuántico entraña una potencia enorme, por una doble razón. Puede encontrarse a la vez en múltiples estados —fenómeno de superposición— y actúa simultáneamente en todos sus estados posibles. De donde se ve que el ordenador cuántico podría realizar de manera natural una miríada de operaciones en paralelo sin más que una unidad de proceso.

Gozan los qubits de otra propiedad más curiosa todavía. Y práctica. Imagínese un proceso físico que emite

NEIL GERSHENFELD e ISAAC L. CHUANG vienen colaborando, desde hace unos años, en problemas de computación cuántica. Gershenfeld enseña en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde dirige un laboratorio de física. Chuang pertenece al grupo de investigación de la empresa IBM en el centro Almaden de San José.





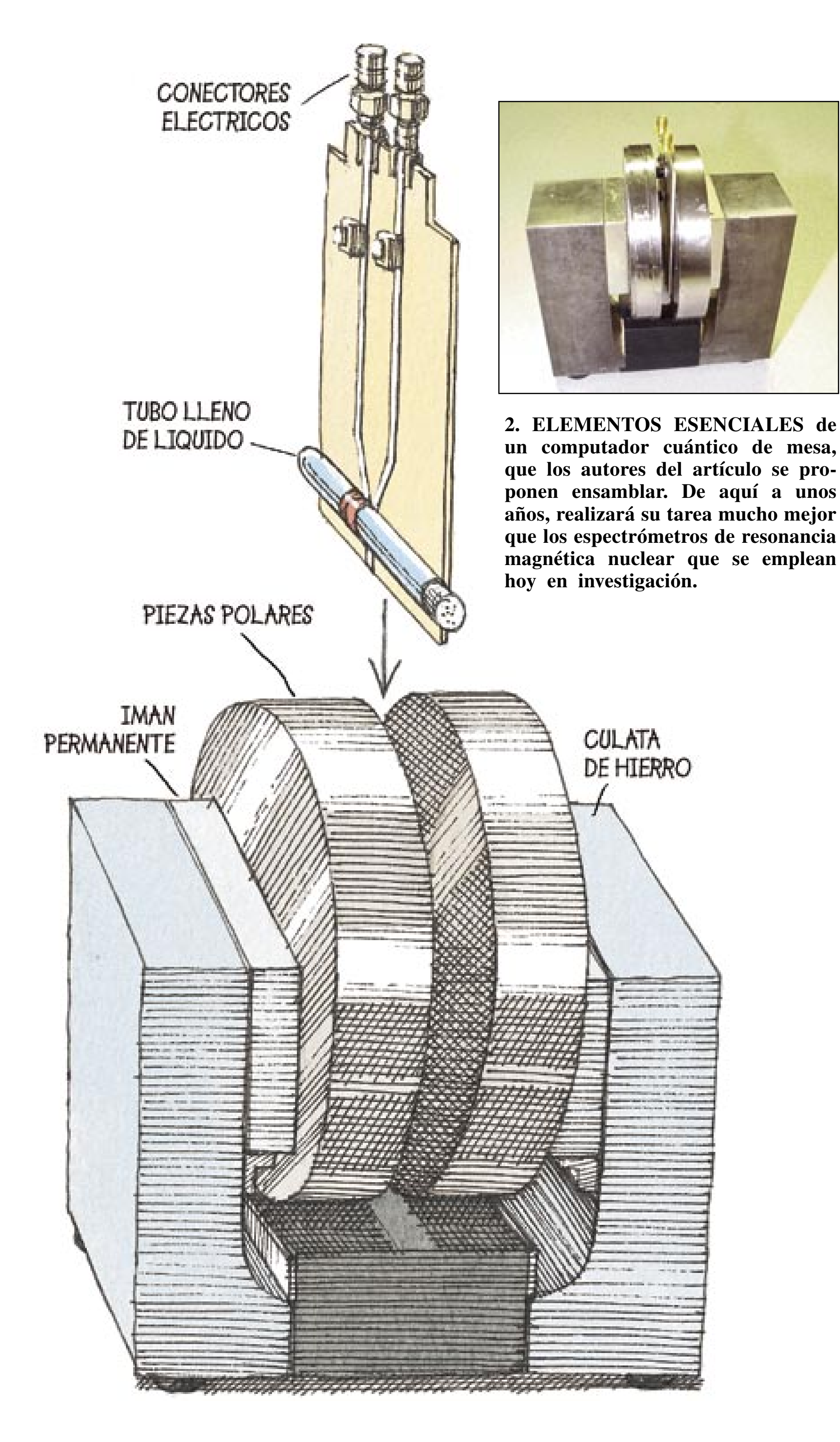
1. LOS COMPUTADORES ELECTRONICOS no tardarán en llegar al límite de sus posibilidades físicas. Por contra, los computadores cuánticos, que se fundan en moléculas de un líquido sometidas a la acción de un campo magnético, podrían convertirse en poderosas máquinas de cálculo.

dos fotones (paquetes de luz), uno hacia la izquierda y otro hacia la derecha, donde los dos fotones porten orientaciones opuestas (polarizaciones) en razón de sus campos eléctricos oscilantes. Mientras no se detecte, la polarización de cada fotón es indeterminada. Según señalaron Albert Einstein y otros a principios de siglo, en el instante en que una persona mide la polarización de un fotón, el estado de la otra polarización queda inmediatamente fijado, sin importar cuán lejos se encuentre. Esa acción instantánea a distancia es harto curiosa. Gracias a dicho fenómeno, los sistemas cuánticos desarrollan una conexión misteriosa, un "enredo", que sirve para poner en conexión los qubits de un ordenador cuántico. Se trata de la misma propiedad que permitió a Anton Zeilinger y colaboradores, de Innsbruck, demostrar el teletransporte cuántico.

En 1994 Peter W. Shor de AT&T acertó en cómo sacarle partido a los fenómenos de enredo y superposición para descomponer un entero en sus factores primos. Descubrió que un ordenador cuántico podría, en principio, realizar la tarea de un modo mucho más veloz de lo que pudiera conseguirse con la mejor calculadora clásica. El hallazgo resonó como una bomba. De repente quedó en entredicho la seguridad de los sistemas de encriptación, que fían, según es sabido, en la dificultad de descomponer en primos números muy grandes. Al ser muchas las transacciones financieras que se blindan tras esos métodos de encriptación, el resultado de Shor sacudió los cimientos del mundo de la economía electrónica.

Nadie había imaginado que tal descalabro vendría provocado desde disciplinas ajenas a la informática o a la teoría de números. En adelante, y por culpa del algoritmo de Shor, los informáticos empezarían a aprender mecánica cuántica y los físicos abrirían su abanico de intereses a la informática.

Cuantos se acercaron al descubrimiento de Shor vieron en seguida que la construcción de un ordenador cuántico funcional opondría una resistencia diabólica. El problema estriba en que cualquier interacción (o casi) que un sistema cuántico tenga con su entorno, piénsese en el choque de un átomo contra otro o contra un fotón errante, constituye una medición. La superposición de estados mecanicocuánticos se resuelve en un solo estado bien definido; y éste es el que el observador detecta. Dicho fenómeno de decoherencia, así se llama, imposibilita cualquier cálculo cuántico ulterior. Al objeto de mantener, pues, la coherencia, las operaciones internas de un ordenador cuántico deben separarse de su entorno. Mas, a la vez, han de ser accesibles para que puedan cargarse, ejecutarse y leerse los cálculos.



2. ELEMENTOS ESENCIALES de un computador cuántico de mesa, que los autores del artículo se proponen ensamblar. De aquí a unos años, realizará su tarea mucho mejor que los espectrómetros de resonancia magnética nuclear que se emplean hoy en investigación.

Los trabajos que nos han precedido, de los que citaremos por su elegancia los experimentos de Christopher R. Monroe y David J. Wineland, del Instituto Nacional de Pesas y Medidas, y de H. Jeff Kimble, del Instituto de Tecnología de California, se propusieron salvar el escollo mediante un escrupuloso aislamiento del corazón mecanicocuántico de sus ordenadores. A este respecto, los campos magnéticos pueden atrapar unas pocas partículas cargadas, que pueden luego enfriarse en estados cuánticos puros. Pese a tales esfuerzos sólo se han logrado operaciones cuánticas rudimentarias; por un doble motivo: estos dispositivos actúan con muy pocos bits y en seguida pierden coherencia.

¿Cómo podría, pues, operar un ordenador mecanicocuántico que necesitara un aislamiento tan estricto de su entorno? Fue el año pasado cuando caímos en la cuenta de que un líquido ordinario podía realizar todos los pasos de un cálculo cuántico: cargar una condición inicial, aplicar las operaciones lógicas a superposiciones enredadas y leer el resultado final. Junto con otro grupo de la Universidad de Harvard y del Instituto de Tecnología de Massachusetts, descubrimos que las técnicas de resonancia magnética nuclear (RMN) —similares a los métodos empleados para la formación de imágenes por resonancia magnética— podían manipular información cuántica en fluidos clásicos.

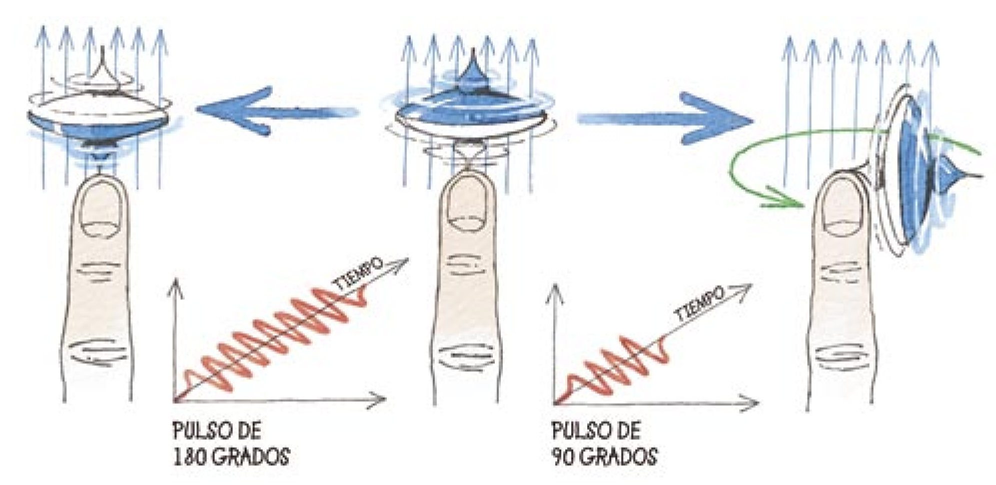
Sucede que podemos abordar con limpieza el problema de la decoherencia si llenamos un tubo de ensayo con un líquido constituido por moléculas apropiadas; esto es, sirviéndonos de muchísimos ordenadores cuánticos individuales en vez de ceñirnos a uno solo. Si representamos cada qubit por un conjunto nutrido de moléculas, podremos dejar que las mediciones interaccionen con algunas. De hecho, los químicos, que han utilizado la RMN durante décadas para estudiar moléculas complejas, han venido realizando computación cuántica sin saberlo.

La resonancia magnética nuclear opera sobre partículas cuánticas de los núcleos atómicos de las moléculas del fluido. Las partículas con espín, que actúan a modo de pequeñas barras magnéticas, se alinearán con un campo magnético externo. Hay dos alineaciones opcionales: paralela y antiparalela al campo magnético; esas alineaciones corresponden a dos estados cuánticos con diferente energía, lo que naturalmente constituye un qubit. Podría suponerse que el espín paralelo corresponde al número 1 y que el espín antiparalelo corresponde al número 0. El espín paralelo tiene menor energía que el antiparalelo, en una cuantía que depende de la intensidad del campo magnético externo aplicado. Por lo común, en un líquido suele haber tantos espines de una orientación como de otra. Pero el campo aplicado desde fuera favorece la creación de espines paralelos, con lo que se produce un ligero desequilibrio entre los dos estados. Tal exceso mínimo, del orden de un núcleo entre un millón, se mide durante un experimento de RMN.

Amén de ese telón de fondo constituido por un campo magnético fijo, en los procesos de RMN intervienen campos electromagnéticos variables. Aplicando un campo oscilante de la frecuencia precisa (determinada por la magnitud del campo fijo y las propiedades intrínsecas de la partícula

involucrada), podemos provocar que algunos espines basculen entre estados. Y ese fenómeno nos permite reorientar a voluntad los espines nucleares.

Pongamos un ejemplo. Podemos forzar que los protones (núcleos de hidrógeno) alojados en un campo magnético fijo de 10 tesla cambien de dirección aplicando un campo magnético que oscile a unos 400 megahertz, frecuencias de radio. Mientras intervienen a lo largo de escasas millonésimas de segundo, las ondas de radio provocarán que los espines nucleares giren en la dirección del campo oscilante, dispuesto en ángulo recto con el campo fijo. Si el pulso oscilante de radiofrecuencia perdura lo suficiente como para hacer girar 180 grados los espines, el exceso de núcleos magnéticos antes alineados en paralelo con el campo fijo apuntarán ahora en sentido opuesto, antiparalelo. El pulso que dure la mitad dejará las partículas con equiprobabilidad de alinearse paralelas o antiparalelas.



3. EL NUCLEO MAGNETICO evoca, en su comportamiento, el de una peonza. El eje de giro se alinea a lo largo de la dirección de un campo magnético aplicado sin cesar (*centro*). Con un campo oscilador adecuado, podemos inducir la reorientación del giro. Por ejemplo, basta un pulso de 180 grados (*izquierda*) para provocar la basculación del núcleo giratorio. Por contra, un pulso de 90 grados (*derecha*) le obligaría a ladearse perpendicularmente al campo magnético constante (*flechas verticales*). Luego será el propio eje de giro el que dé vueltas lentamente, a la manera del final del movimiento de una peonza.

De acuerdo con la mecánica cuántica, los espines se hallarán simultáneamente en ambos estados, 0 y 1. El cuadro clásico de esta situación nos ilustra el eje del espín de la partícula formando ángulo de 90 grados con el campo magnético fijo. Luego, a la manera de una peonza que se inclina alejándose de la fuerza vertical de la gravedad, el eje del espín de la propia partícula gira, desarrolla un movimiento de precesión en torno al campo magnético, yendo y viniendo con una frecuencia característica. Mientras se comporta así, emite una débil señal de radio, recogida por un aparato de RMN.

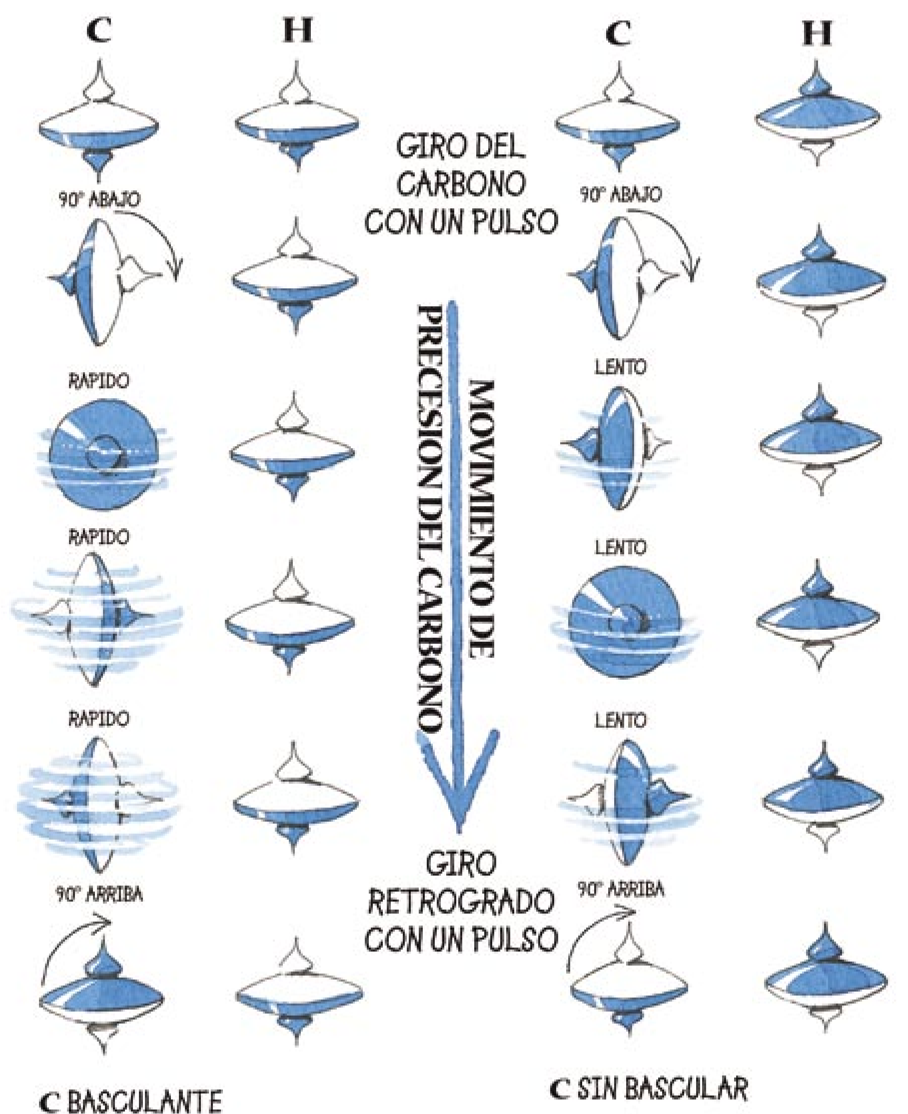
En un experimento con RMN, las partículas no se limitan a sufrir el campo aplicado, sino que cada núcleo atómico deja sentir su influencia en el campo magnético circundante. En un líquido, el movimiento constante de las moléculas uniformiza la mayoría de las ondulaciones magnéticas locales. Pero un núcleo magnético puede afectar a otro de la misma molécula cuando perturba los electrones en órbita alrededor de ambos.

En vez de plantear ningún problema, esta interacción en el interior de la molécula resulta muy valiosa. Permite construir con dos espines nucleares una “puerta lógica”, la unidad básica de cómputo. En nuestros experimentos con dos espines utilizamos cloroformo ($CHCl_3$). Nos interesaba aprovechar la interacción entre los espines de los núcleos de carbono e hidrógeno. Puesto que el núcleo del carbono 12, isótopo común, no tiene espín, utilizamos cloroformo cuyo carbono portaba un neutrón extra, que le imparte un espín global.

Supongamos que el espín del hidrógeno se dirige hacia arriba o hacia abajo, paralelo o antiparalelo a un campo magnético aplicado verticalmente, mientras que el espín del carbono señala decididamente hacia arriba, paralelo al campo magnético aplicado. Con un pulso de radiofrecuencia bien proyectado, podemos inducir el giro del espín del carbono hacia abajo, en el plano horizontal. El núcleo de carbono progresará en precesión hacia la vertical, con una velocidad de rotación que dependerá de que el núcleo de hidrógeno de dicha molécula sea también paralelo al campo aplicado. Tras cierto tiempo, el carbono señalará en un sentido o en el opuesto, según que el espín del hidrógeno vecino apunte hacia arriba o hacia abajo. En ese instante, aplicamos otro pulso de radiofrecuencia para girar el núcleo de carbono otros 90 grados. Esta maniobra invierte el núcleo de carbono hacia abajo si el hidrógeno adyacente mira hacia arriba, o hacia arriba si el hidrógeno miraba hacia abajo.

Este conjunto de operaciones corresponde a lo que los ingenieros electrónicos denominan puerta lógica O disyuntiva, y debiera mejor llamarse puerta NO bajo control (en el sentido de que el estado de entrada uno controla si la señal presentada en la otra entrada se invierte a la salida). Los ordenadores clásicos requieren puertas similares de doble entrada y puertas NO de una sola entrada más sencillas; en 1995, sin embargo, se demostró que los cálculos cuánticos pueden desarrollarse mediante rotaciones aplicadas a espines individuales y puertas NO bajo control. La verdad es que esta puerta lógica cuántica es mucho más versátil que su contrapartida clásica, por la sencilla razón de que los espines en que se basa pueden hallarse en superposición de estados arriba y abajo. Lo que significa que puede ejecutarse simultáneamente la computación cuántica en una combinación de entradas que se dirían incompatibles.

En 1996 acordamos con Mark G. Kubinec, de la Universidad de California en Berkeley, construir un modesto ordenador mecanicocuántico, de dos bits, a partir de un dedal de cloroformo. La preparación del dispositivo de entrada, aunque sea para un dispositivo de dos bits, no es tarea sencilla. Exige que una serie de pulsos de radiofrecuencia transforme los núcleos incontables del líquido experimental en un grupo ordenado que presente los espines en exceso dispuestos de la forma correcta. A continuación, estos qubits deben modificarse secuencialmente. En oposición a lo que acontece con los bits de un ordenador clásico, que viajan en orden a través de una red de puertas lógicas conforme se desarrolla el cálculo, los qubits no van a ningún lado. Antes bien, se les trae a las puertas lógicas con diversas manipulaciones de RMN. En esencia, el programa a ejecutar se



4. LA PUERTA LOGICA NO BAJO CONTROL invierte una de dos entradas según el estado en que se halle la segunda. Los autores crearon una puerta cuántica NO bajo control recurriendo a la interacción entre los espines nucleares del hidrógeno y el carbono en las moléculas de cloroformo. En primer lugar, un pulso oscilatorio induce un giro selectivo del núcleo de carbono en 90 grados. Ese núcleo acomete después un rápido movimiento de precesión, si el hidrógeno adyacente se encuentra en estado uno, o lento, si el hidrógeno se halla en el estado opuesto. Tras esperar cierto tiempo, y aplicando otro pulso de 90 grados, observaremos que el carbono se invierte (*izquierda*) o persiste tal cual era en un comienzo (*derecha*), a tenor del estado del hidrógeno inmediato.

compila en una serie de pulsos de radiofrecuencia.

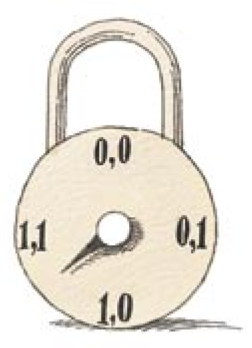
Conseguimos que pusiera en práctica las posibilidades únicas de la computación mecanicocuántica. El cálculo en cuestión seguía un ingenioso algoritmo de búsqueda ideado por Lov K. Grover, de los Laboratorios Bell. En un ordenador, la búsqueda típica de un elemento que se encuentra en algún lugar de una base de datos de *n* elementos necesitará, en promedio, cerca de *n*/2 intentos para descubrirlo. Con la búsqueda cuántica de Grover, maravillosamente, se recupera el elemento deseado en $\sqrt{n}$ intentos. A modo de ejemplo de este ahorro, demostramos que nuestro ordenador cuántico de dos qubits podía encontrar, en un solo paso, un elemento determinado escondido en una lista de cuatro posibilidades. La solución clásica de este problema es análoga a abrir un candado de dos bits al azar: no es verosímil dar con la combinación correcta a la primera. El método clásico de resolución necesitará, en promedio, de dos a tres intentos.

En el exiguo número de qubits tiene el ordenador de cloroformo su limitación fundamental. Pero podrían aumentarse, aunque *n* no sería nunca mayor que el número de átomos de la molécula empleada. Con el equipo de RMN disponible, los mayores ordenadores cuánticos que podríamos construir contarían sólo con unos 10 qubits (porque a temperatura ambiente la intensidad de la señal decrece vertiginosamente conforme aumenta el número de núcleos magnéticos de la molécula). Si se diseñaran instrumentos de RMN especiales para determinada molécula, podríamos triplicar o cuadruplicar ese número. Mas para crear ordenadores mayores, habría que desarrollar, entre otras, técnicas de bombeo óptico que "enfriaran" los espines. Dicho de otro modo: la luz de un láser adecuado ayuda a alinear los núcleos con la misma eficacia que si eliminamos el movimiento térmico de las moléculas, aunque sin congelar el líquido y demoliendo su capacidad de mantener tiempos de coherencia prolongados.

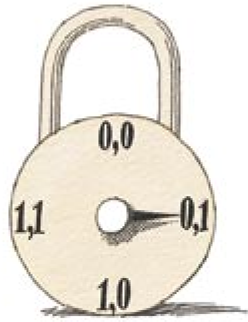
Podrían, pues, construirse computadores cuánticos mayores. Pero, ¿qué velocidades alcanzarían? El tiempo de ciclo de un computador cuántico lo establece la más lenta de las velocidades a las que los espines basculan, parámetro que, a su vez, viene impuesto por las interacciones entre espines. Se sitúa entre centenares de ciclos por segundo y escasas unidades de ciclos por segundo. Aunque una celeridad de varios ciclos de reloj cada segundo pudiera parecernos exasperante en comparación con la velocidad de megahertz con que operan los computadores normales, un computador cuántico con qubits suficientes alcanzaría tal paralelismo cuántico, que en un solo año resolvería la descomposición en números primos de una cifra de 400 dígitos.

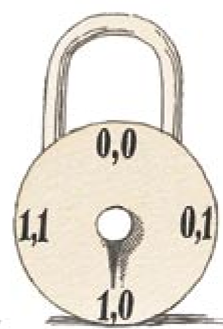
Ante semejante perspectiva, hemos meditado sobre las posibilidades de la construcción real de un computador cuántico. El problema no está en hallar moléculas con suficientes átomos. Lo frustrante empieza luego: conforme crece el tamaño de una molécula, las interacciones entre espines alejados se desvanecen tanto, que no podemos emplearlas de puertas lógicas. Pero no está todo perdido. Seth Lloyd, del MIT, ha demostrado que, en principio, podrían construirse computadores cuánticos, aun cuando cada átomo interaccionara con sólo sus vecinos inmediatos, a la manera en que proceden los computadores en paralelo de nuestros días. Ese proto-

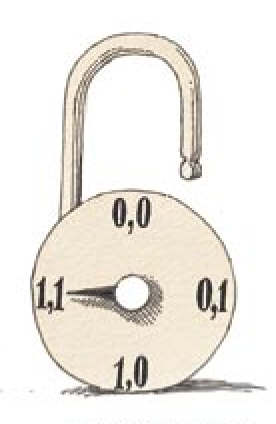
BLOQUEO CLASICO DE UNA COMBINACION





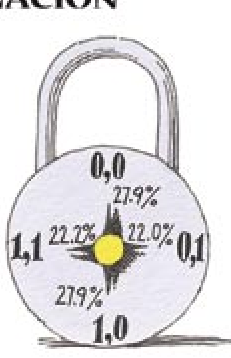


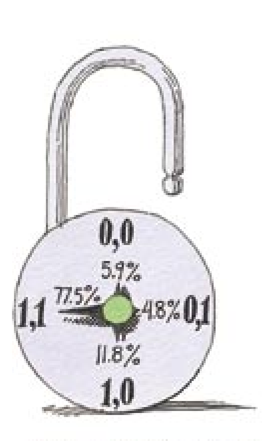




BLOQUEO CUANTICO DE UNA COMBINACION







5. PARA DESCERRAJAR una combinación necesitaremos menos tanteos si nos valemos de una triquiñuela cuántica. En un bloqueo clásico de dos bits podríamos acometer hasta cuatro intentos antes de hacer saltar el candado (*arriba*). En promedio, un bloqueo de *n* bits exige *n*/2 intentos. Puesto que un cierre cuántico puede ponerse simultáneamente en varios estados, precisa no más de $\sqrt{n}$ pasos para romperlo, si seguimos el algoritmo de Grover. En su experimento, los autores se proponen abrir un bloqueo cuántico de dos bits, que (tras una preparación conveniente) puede descerrajarse en un solo paso (*abajo*). Los números pintados en la esfera denotan las poblaciones relativas medidas en cada uno de los cuatro estados cuánticos.

tipo de computador cuántico podría fabricarse con largas moléculas de hidrocarburos, recurriendo asimismo a las técnicas de RMN. Los espines de muchos núcleos atómicos, ligados en largas cadenas, servirían entonces de qubits.

Otro freno contra la realización práctica de la computación de RMN reside en la coherencia. Los núcleos en rotación de un fluido empezarán a perder coherencia tras un intervalo que podemos cifrar entre segundos y minutos. Los mayores tiempos de coherencia para líquidos, comparados con los tiempos de ciclo característicos, sugieren que podrían realizarse unas 1000 operaciones sin perder la coherencia cuántica. Para nuestra fortuna, podemos ensanchar ese límite mediante la incorporación de qubits adicionales que enmienden los errores cuánticos.

Para detectar y corregir errores, los computadores clásicos emplean bits extra. Nadie imaginaba, sin embargo, lo que demostraron Shor y otros: en mecánica cuántica acontecía otro tanto. Creíase ingenuamente que la corrección cuántica de errores precisaría la medición del estado del sistema, con la demolición consiguiente de la coherencia cuántica. Resulta, sin embargo, que los errores cuánticos pueden corregirse dentro del computador sin que el ejecutor tenga que leer el estado erróneo.

Pese a todo, no será fácil conseguir un computador cuántico cuyas proporciones le permitan entrar en liza con los más rápidos de los clásicos. Pero el reto merece la pena. Los computadores cuánticos, por modestos que sean, se convertirán en soberbios laboratorios naturales donde poder estudiar la mecánica cuántica. Con semejantes dispositivos y la ejecución de un programa adecuado, podrán abordarse otros sistemas cuánticos que revisten interés fundamental.

Por ironía de las cosas, los computadores cuánticos podrían ayudar a científicos e ingenieros en la resolución de los problemas que se les plantean en la creación de microcircuitos ínfimos con transistores mínimos; muestran éstos un comportamiento mecanicocuántico cuando la reducción de su tamaño llega al límite de las posibilidades.

Tal vez la cara más sonriente del asunto la ofrezca el convencimiento de que su fabricación no precisará imprimir circuitos finísimos de escala atómica ni de cualquier otra filigrana de la nanotécnica. La naturaleza se ha encargado ya de ejecutar la parte más ardua del proceso mediante la reunión de los componentes fundamentales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COMPUTACIÓN MECANICOCUÁNTICA. Seth Lloyd en *Investigación y Ciencia*, n.º 231, pags. 20-26; diciembre de 1995.

BULK SPIN-RESONANCE QUANTUM COMPUTATION. N. A. Gershenfeld e I. L. Chuang en *Science*, vol. 275, págs. 350–356; 17 de enero de 1997.

QUANTUM MECHANICS HELPS IN SEARCHING FOR A NEEDLE IN A HAYSTACK. L. K. Grover en *Physical Review Letters*, vol. 79, n.º 2, págs. 325–328; 14 de julio de 1997.

Gradiometría de gravedad

Una técnica de navegación, otrora secreta, que empleaban los submarinos con misiles nucleares les vale ahora a los geólogos para buscar recursos escondidos en el subsuelo

Robin E. Bell

Durante la guerra fría, las tripulaciones de los submarinos de ambos lados del telón de acero debían guiar sus embarcaciones en la oscuridad del océano. Cierto es que siempre podían conectar sus sonares para detectar los obstáculos que hubiese delante o bajo la quilla; pero así emitían señales acústicas, esos perceptibles "pings" que enseguida les descubrían ante los enemigos. No era, pues, la forma más adecuada para un buen oficial.

Para que la navegación submarina soviética y estadounidense contase con ayudas más discretas se concibieron los gradiómetros de gravedad. Medían las variaciones minúsculas de la atracción gravitatoria causadas por las dorsales submarinas. Salvo el *Octubre Rojo*, el submarino de la novela de Tom Clancy, ningún navío soviético real dispuso de instrumento tan sensible. Sólo lo portaban los submarinos estadounidenses con misiles nucleares. Durante muchos años fue un secreto militar bien guardado. Ahora lo usamos geólogos civiles para precisar la localización de las bolsas de petróleo y de gas en las profundidades del subsuelo.

Es curioso que el empeño de los geólogos de hoy por explotar esta técnica halle un precedente en las primeras mediciones de la fuerza de la gravedad. El barón Roland von Eötvös, físico húngaro, la midió en 1890 de manera novedosa con un instrumento sencillo. Otros físicos del siglo XIX cronometraban el movimiento de un péndulo; así medían los cambios minúsculos de gravedad causados por las mareas lunares y solares. Pero el instrumento de Eötvös era más sensible: medía variaciones diminutas de gravedad en un lugar —el gradiente gravitatorio— causadas por la presencia de un objeto cercano de masa suficiente.

Constaba de un brazo de metal con pesos en ambos extremos. Si la gravedad variaba con la posición, la fuerza ejercida sobre el peso adosado a uno de los lados no era idéntica a la aplicada en el otro; el brazo, que estaba suspendido de un alambre fino, sufría entonces una fuerza de rotación. Midiendo el giro Eötvös determinaba la variación de la fuerza de la gravedad en función de la posición. Este aparato, la balanza de torsión, fue el primer instrumento que acertó a medir gradientes gravitatorios.

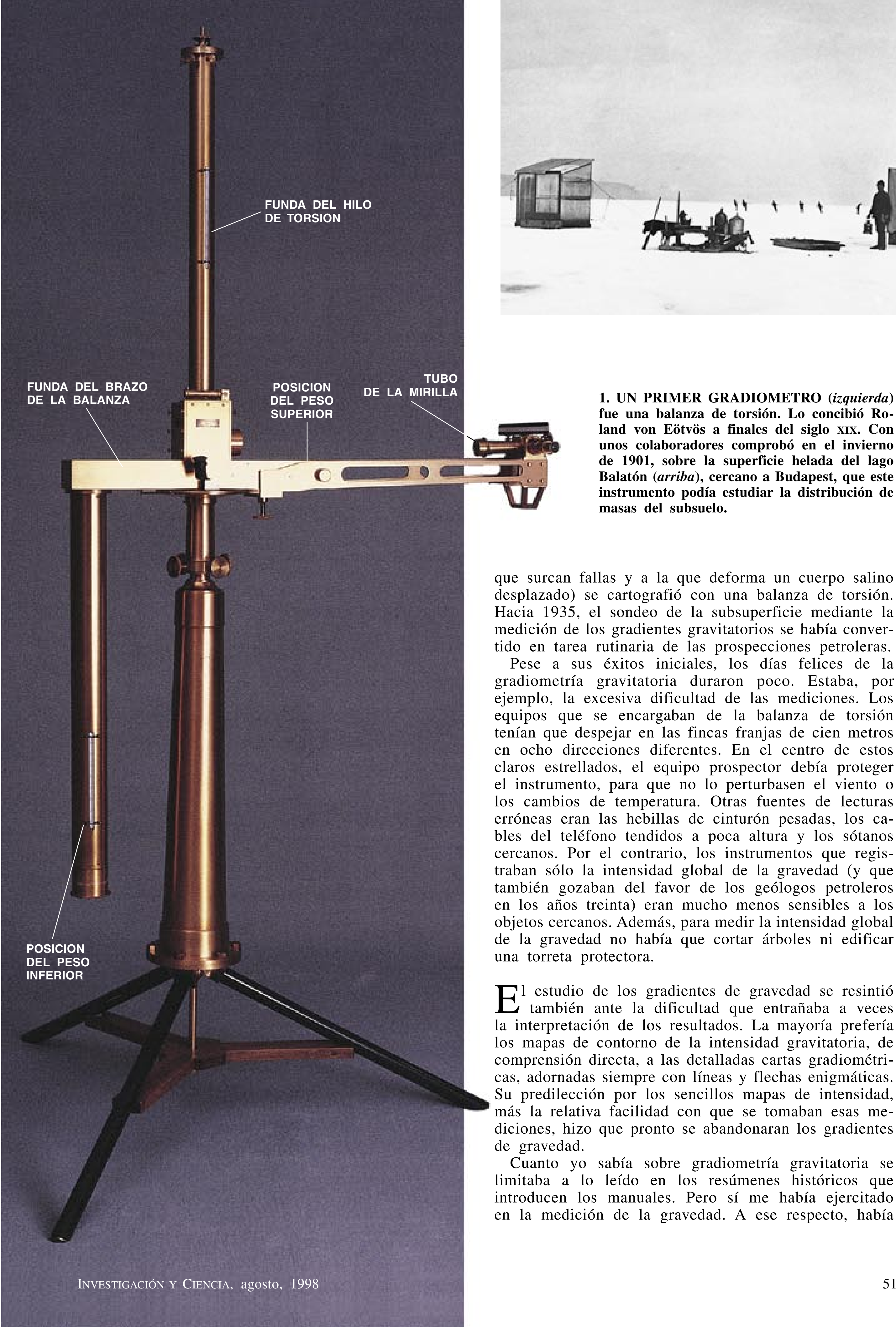
El director del servicio de inspección geológica húngaro, Hugo de Boeckh, seguía con atención los trabajos de Eötvös. Comprendió que, si le convencía de que sacase su delicada balanza del laboratorio y se la llevaban a campo abierto, podrían valerse de los gradientes de gravedad para detectar estructuras geológicas de interés, escondidas bajo la superficie del terreno. Tras analizar el asunto, Eötvös y de Boeckh realizaron en 1901 una serie de experimentos.

Temían en un comienzo que los gradientes naturales no fueran lo bastante grandes para que los sintiese la balanza de torsión. Hicieron la prueba inicial sobre un lago helado. Si el instrumento funcionaba, pensaban, saldría un mapa de gradientes de gravedad que reflejaría la configuración de la cubeta del lago, perfil bien conocido gracias a los sondeos hechos en veranos anteriores con una plomada. Físico y geólogo se felicitaron cuando, al trazar los resultados de la balanza de torsión en un mapa, vieron un patrón que coincidía con los contornos del suelo del lago. Abordaron estudios geológicos más complejos sin salirse de la región, pero enseguida despertaron la atención de los prospectores de petróleo.

La primera guerra mundial frenó iniciativas. Terminada ésta, los geólogos estadounidenses decidieron probar el aparato de Eötvös para buscar petróleo. Esperaban, en particular, que detectase domos de sal. Suele haber alrededor de los costados de estas estructuras en forma de hongo, a veces de más de un kilómetro de espesor, enormes bolsas de petróleo y de gas. Puesto que la sal no tiene por qué ascender a la superficie, puede ser difícil dar con ellos; pero es menos densa que la mayoría de las rocas y ejerce una atracción gravitatoria más débil. Un cuerpo salino enterrado quedará perfilado por la transición hacia valores bajísimos de fuerza gravitatoria, es decir, por unos gradientes de gravedad.

Los geólogos de Amerada Hess Corporation alcanzaron un hito histórico en 1924: con las mediciones de los gradientes de gravedad aportadas por una balanza de Eötvös encontraron un domo salino. Se encadenaron los descubrimientos. Con gradiómetros de gravedad los geólogos cartografiaron formaciones subterráneas más complejas. La estructura geológica sobre la que descansa la ciudad de Houston (una roca sedimentaria buzada,

ROBIN E. BELL empezó a interesarse por la gravedad el año 1980, en el Servicio Geológico de los Estados Unidos en Woods Hole. Allí midió durante varias campañas la gravedad en barco, frente a la costa oriental, antes de trasladarse al Observatorio de la Tierra Lamont-Doherty, de la Universidad de Columbia. Ha estudiado la descomposición de la capa de hielo de la Antártida occidental y el recurso a la gravedad para cartografiar estructuras geológicas que escondan bolsas de petróleo y gas.



1. UN PRIMER GRADIOMETRO (*izquierda*) fue una balanza de torsión. Lo concibió Roland von Eötvös a finales del siglo XIX. Con unos colaboradores comprobó en el invierno de 1901, sobre la superficie helada del lago Balatón (*arriba*), cercano a Budapest, que este instrumento podía estudiar la distribución de masas del subsuelo.

que surcan fallas y a la que deforma un cuerpo salino desplazado) se cartografió con una balanza de torsión. Hacia 1935, el sondeo de la subsuperficie mediante la medición de los gradientes gravitatorios se había convertido en tarea rutinaria de las prospecciones petroleras.

Pese a sus éxitos iniciales, los días felices de la gradiometría gravitatoria duraron poco. Estaba, por ejemplo, la excesiva dificultad de las mediciones. Los equipos que se encargaban de la balanza de torsión tenían que despejar en las fincas franjas de cien metros en ocho direcciones diferentes. En el centro de estos claros estrellados, el equipo prospector debía proteger el instrumento, para que no lo perturbasen el viento o los cambios de temperatura. Otras fuentes de lecturas erróneas eran las hebillas de cinturón pesadas, los cables del teléfono tendidos a poca altura y los sótanos cercanos. Por el contrario, los instrumentos que registraban sólo la intensidad global de la gravedad (y que también gozaban del favor de los geólogos petroleros en los años treinta) eran mucho menos sensibles a los objetos cercanos. Además, para medir la intensidad global de la gravedad no había que cortar árboles ni edificar una torreta protectora.

El estudio de los gradientes de gravedad se resintió también ante la dificultad que entrañaba a veces la interpretación de los resultados. La mayoría prefería los mapas de contorno de la intensidad gravitatoria, de comprensión directa, a las detalladas cartas gradiométricas, adornadas siempre con líneas y flechas enigmáticas. Su predilección por los sencillos mapas de intensidad, más la relativa facilidad con que se tomaban esas mediciones, hizo que pronto se abandonaran los gradientes de gravedad.

Cuanto yo sabía sobre gradiometría gravitatoria se limitaba a lo leído en los resúmenes históricos que introducen los manuales. Pero sí me había ejercitado en la medición de la gravedad. A ese respecto, había

instalado un gravímetro electrónico bastante refinado en un avión y volado con él sobre la Antártida occidental, para estudiar la geología oculta bajo la espesa capa de hielo. Por pura casualidad me vi enredada en la gradiometría gravitatoria.

Hace de ello cuatro años. Estaba muy cercano el momento del alumbramiento de mi segundo hijo. Quería centrar la investigación en algo que no requiriera un trabajo de campo excesivamente largo. En ésas, entré en el despacho de Roger N. Anderson, que había trabajado en el estudio de cuerpos salinos planos del golfo de México; forman éstos láminas muy extensas. Las capas de sal, parecidas a edredones de plumas, ocultan las estructuras subyacentes, justamente las que interesan a los geólogos que buscan petróleo y se aprestan a cartografiar con los métodos sísmicos corrientes. (Las técnicas sísmicas, como los sondeadores acústicos de profundidad que se usan en el mar, se basan en la penetración de las ondas sonoras.) Anderson me preguntó si podría hacer que mi gravímetro aerotransportado volase sobre el área que estudiaba, para comparar los resultados con medidas gravitatorias similares tomadas desde un barco. Se trataba de examinar la variación de gravedad en función de la altura, una forma de gradiometría gravitatoria.

Aunque el método parecía bueno en teoría, la práctica me había enseñado cuán difícil resulta hacer mediciones precisas desde un avión. Hasta en los vuelos más tranquilos las mediciones de la gravedad tomadas a bordo no son del todo fiables, porque la nave siempre salta un poco arriba y abajo. Le indiqué, pues, a mi compañero la presumible imposibilidad de extraer los gradientes con unos datos repletos de ruido. Pero esa misma noche se me ocurrió que los gradiómetros de gravedad de los submarinos podrían resolver el problema. Sabía de su existencia por el fabricante del gravímetro que había usado en la Antártida. Los instrumentos militares modernos emplean un conjunto de seis pares rotativos de sensores de gravedad para medir el gradiente gravitatorio completo (una magnitud tridimensional con cinco componentes independientes). Pero, ¿se nos franquearía el acceso a una técnica militar secreta?

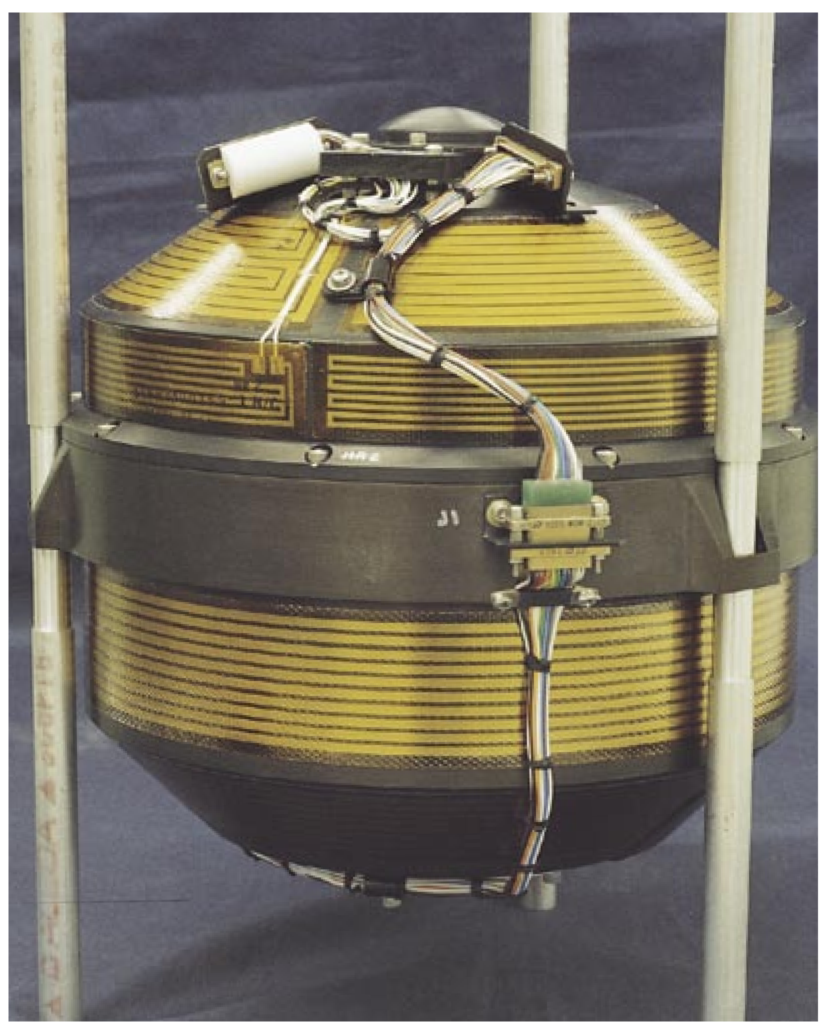
Nos trasladamos a Buffalo, una semana después, para visitar la factoría donde Bell Aerospace (integrada ahora en Lockheed Martin) fabricaba los gradiómetros de los submarinos. La actividad fabril había decaído. Sin un flujo constante de pedidos militares, los instrumentos que esta compañía producía hubieran acumulado una montaña de polvo. Algunos ingenieros de la empresa habían pensado que con esos sensibles aparatos de medida se podría controlar la carga de los camiones en marcha, pero no se les había hecho caso. Nuestra idea de aplicarlos a la exploración de pozos despertó un vivo interés.

Con la ayuda de John J. Brett (ingeniero jubilado, y conocedor de los proyectos militares secretos), convencimos a los responsables de Bell Aerospace, de la marina de los Estados Unidos y de varias compañías petroleras de que colaborasen con nosotros; queríamos comprobar si los gradiómetros gravitatorios ofrecerían datos nuevos acerca de las formaciones geológicas cargadas de petróleo que hay debajo del golfo de México. Para las pruebas seleccionamos un área a unos 130 kilómetros al sudeste de Nueva Orleans; en ella había un enorme cuerpo de sal con forma de bota. Los geólogos de Texaco aportaron los mapas geológicos subsuperficiales que habían levantado estudiando sísmicamente la región. Y la marina aceptó medir los gradientes de gravedad del área con un gradiómetro militar instalado en uno de sus barcos de investigación. Cualquier diferencia entre las señales gravitatorias que predecíamos basándonos en los datos sísmicos y el resultado del nuevo estudio gradiométrico sería un importante descubrimiento acerca de la geología de la región.



2. UN ESTUDIO GEOLOGICO efectuado con un gradiómetro de balanza de torsión cerca de Hannover en 1917 demostró que las mediciones de los gradientes de gravedad podían delinear la sal enterrada, que es menos densa que la roca que la circunda. La formación de esos cuerpos salinos perturba las capas sedimentarias adyacentes y hace que el petróleo y el gas se acumulen en bolsas próximas (*áreas marcadas*).

3. ESTE GRADIOMETRO MODERNO (*derecha*), del tipo que iba a bordo de algunos submarinos de misiles nucleares (*abajo*), contiene seis pares de sensores de gravedad electromecánicos, o acelerómetros. La diferencia entre dos acelerómetros, enfrente uno del otro y separados una distancia pequeña, refleja el gradiente gravitatorio local. Pero el resultado de estos sensores tiende también a cambiar con el tiempo. Para descubrir el verdadero gradiente gravitatorio, pues, se intercambian repetidamente, por medio de tres plataformas giratorias que hay dentro del instrumento, las posiciones de los sensores emparejados.





Vino entonces la parte más difícil del experimento. Como el sistema gradiométrico del submarino era todavía secreto militar, buena parte del diseño de los protocolos experimentales y de la evaluación de los datos en bruto se desarrolló en un despacho cerrado a cal y canto para los geólogos civiles. Tuvimos, pues, que dedicarnos a elaborar las técnicas que nos permitiesen interpretar los gradientes gravitatorios. En cierto sentido, volvíamos a vérnoslas con los problemas que nuestros predecesores de los años treinta tuvieron que encarar. Pero no era lo mismo. Disponíamos de ordenadores personales con que agilizar la tarea. Y a lo largo de los siguientes meses, cuando de las oficinas blindadas de Buffalo iban saliendo ristras "esterilizadas" de datos (sin la menor contaminación de secreto oficial), se nos fue evidenciando la potencia del gradiómetro de gravedad.

Nuestros primeros resultados mostraban que los gradientes de gravedad medidos por el barco de la marina se parecían a los predichos a partir de los datos sísmicos, pero el análisis posterior descubrió diferencias curiosas. Aunque la discrepancia era sutil en el mapa de gravedad global, saltaba a la vista cuando se miraba el patrón producido por los gradientes. Esas mediciones nos indicaban que había más masa en la región de la que habíamos predicho a partir del estudio sísmico. Los gradientes nos decían con precisión dónde estaba la masa y manifestaban su forma con sumo detalle. La formación recién descubierta era una densa unidad de roca que recordaba a un sombrero.

Una vez convencidos de que interpretábamos correctamente los gradientes, queríamos comprobar nuestra conclusión. Un examen directo estaba fuera de lugar; se necesitan millones de dólares para perforar la sal enterrada. Nos pusimos en contacto con Bryant E. Korn, geofísico de la Texaco, para corroborar si nuestro resultado coincidía con su último rastreo de la geología subsuperficial. Examinó un nuevo estudio sísmico que su empresa acababa de compilar justo en la misma región y, sin que nosotros le moviéramos a fijarse en ningún punto determinado, identificó un accidente geológico hasta entonces pasado por alto en la misma zona donde nosotros lo habíamos inferido, con nuestras mediciones del gradiente gravitatorio. Su análisis independiente sugería, además, que la estructura que acababa de descubrirse se parecía a un sombrero. Quedaba demostrado que las mediciones del gradiente de gravedad podían descubrir un cuerpo salino enterrado, y hacerlo con la eficacia de un estudio sísmico minucioso. La perspectiva de encontrar petróleo con esa técnica de los submarinos parecía, pues, excelente.

Desde el final de la guerra fría se ha intensificado la tendencia a comercializar las técnicas desarrolladas para la defensa. En esa línea, el gobierno ha levantado el secreto de la información relativa a los gradiómetros de gravedad militares; gracias a ello, las petroquímicas

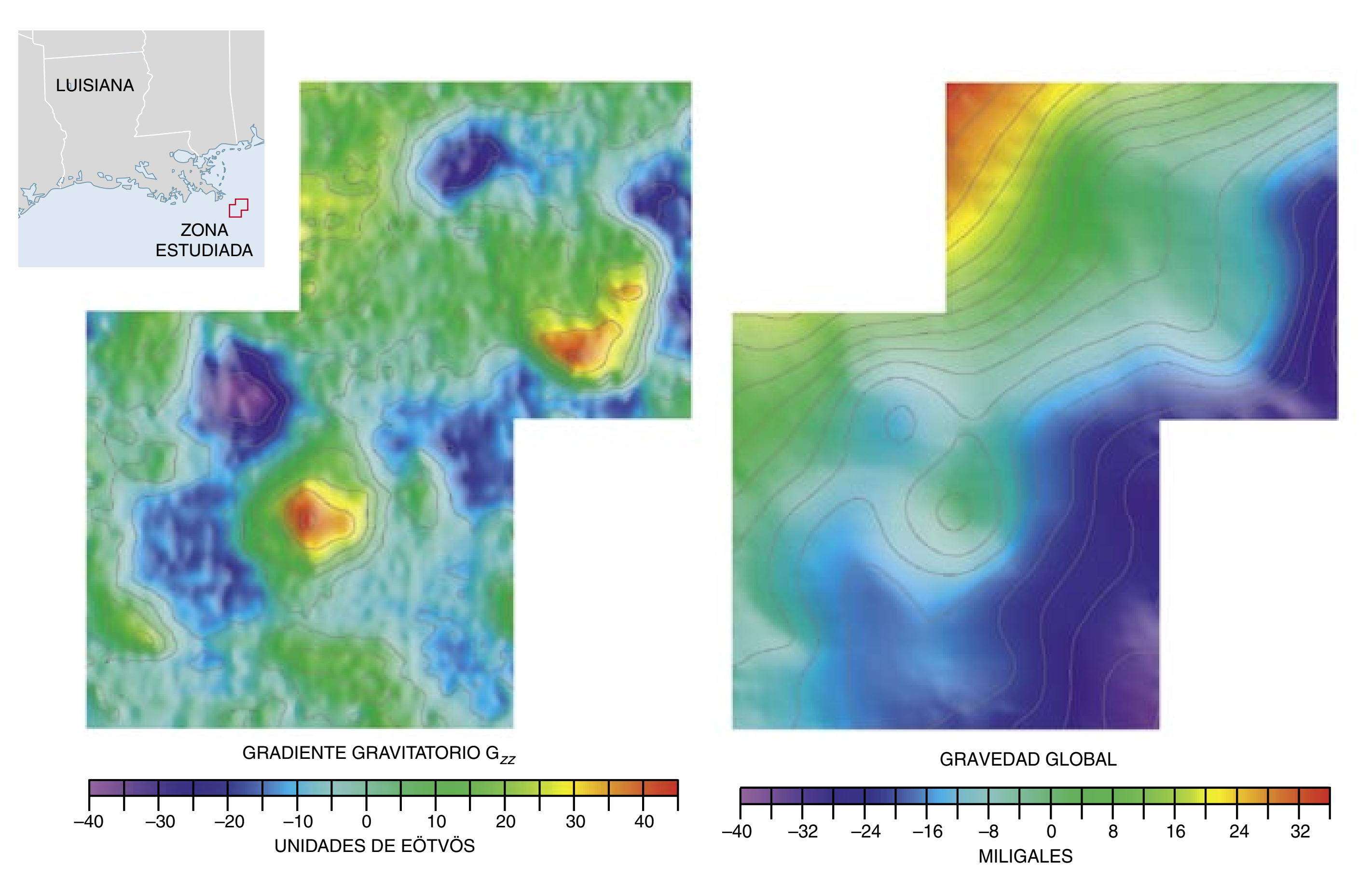
Hacia una imagen más nítida

Para extraer mayor información de las masas ocultas en el subsuelo, pueden los geólogos medir los gradientes gravitatorios. La fuerza de la gravedad (G) se describe matemáticamente con sólo tres elementos (que representan las componentes de la gravedad en las direcciones *x*, *y*, *z*). El gradiente, en cambio, necesita nueve cantidades, que forman una matriz cuadrada, y representa el campo gravitatorio en forma tensorial (*a la derecha*).

El elemento G_{xy} del tensor de gradientes, por ejemplo, es una medida de la celeridad con que la componente de la gravedad en la dirección *x* (G_x) cambia al moverse uno por la dirección *y*. El elemento G_{yz} representa el cambio de la componente de la gravedad en la dirección *y* (G_y) al moverse por la dirección *z*, y así sucesivamente. Como G_{xx}, G_{yy}, G_{zz} tienen que sumar cero, y como los demás elementos deben coincidir a pares (por ejemplo, G_{xy} es igual a G_{yx}), con cinco mediciones basta para determinar el tensor de gradientes completo.

La cartografía de los gradientes gravitatorios mejora los estudios gravitatorios corrientes porque ofrece una imagen más detallada de la subsuperficie. Por ejemplo, un avión convenientemente equipado que sobrevuele una montaña (un exceso de masa) o un cuerpo salino subterráneo de baja densidad (un déficit de masa) mostrará sólo variaciones sutiles de la atracción gravitatoria global. En cambio, la medición de los correspondientes gradientes gravitatorios revelará esos accidentes geológicos inmediatamente (*abajo*). El movimiento errático del avión crea un “ruido” considerable en un solo perfil gravitatorio, mientras que la medida de la diferencia entre dos sensores para obtener el gradiente elimina automáticamente la fuente de error.

—R.E.B.



4. LOS MAPAS GRAVITATORIOS ayudan a los geólogos a encontrar yacimientos de petróleo y de gas enterrados. Por ejemplo, las mediciones de la componente G_{zz} del gradiente de gravedad en una parte del golfo de México proporcionan una descripción detallada de las formaciones de sal subterráneas (*izquierda*). En cambio, las mediciones corrientes de la gravedad obtenidas para la misma área revelan sólo un vago contorno de la sal enterrada (*derecha*). Este estudio se realizó frente al delta del río Mississippi en 1995 (*arriba a la izquierda*).

tienen ahora libertad para completar con este método sus sondeos sísmicos. Hasta ahora son siete las que se ayudan con la gradiometría gravitatoria en la investigación de lo que pudieran ser bolsas de petróleo bajo el golfo de México. Edward K. Biegert, geólogo de la Shell, ha hallado que cartografiando los gradientes de gravedad alrededor de un domo de sal puede determinar mejor las estructuras subyacentes. En sus primeras cartas de la subsuperficie alrededor de un domo, la base de la sal aparecía borrosa y mal definida. Pero con la información que sacó de los gradientes se percibía nítidamente la parte inferior del cuerpo salino.

La minería se afana también por comprobar si los gradiómetros de gravedad sirven para descubrir vetas escondidas en terrenos inaccesibles o traicioneros. Las compañías mineras han invertido millones de dólares en los gravímetros aerotransportados con la esperanza de que detectasen desde el aire masas de mineral, pero el problema de los saltos de los aviones ha frustrado sus mejores esfuerzos. La medición de los gradientes gravitatorios ofrece una forma de soslayar esa dificultad: las aceleraciones que causa la turbulencia del aire pueden imitar la atracción general de la gravedad, pero no crean gradientes gravitatorios espurios.

Esta posibilidad quizás abra una nueva frontera de la física aplicada. Ingenieros australianos han desarrollado una versión superconductora del instrumento rotativo de Eötvös que puede llevarse en un avión. Bell Geospace, compañía que Anderson y yo contribuimos a fundar en 1994, emplea la técnica concebida para los submarinos en la construcción de un gradiómetro gravitatorio que pueda usarse en un avión.

Estos proyectos podrían hacer que la gradiometría de gravedad sea tan atractiva para algunos geólogos como lo fuera para los oficiales de submarinos. Los viejos métodos de toma de estas mediciones perturbaban grandes franjas de terreno, explanadas por los camiones y los bulldozers de los equipos geológicos de campo; en cambio, la gradiometría gravitatoria hecha desde un avión no daña en absoluto el terreno explorado. Lo mismo que se suponía que el submarino *Octubre Rojo* navegaba sin ser detectado gracias a un gradiómetro de gravedad, puede que pronto se disponga de una nueva herramienta que ayude a buscar los recursos naturales escasos.

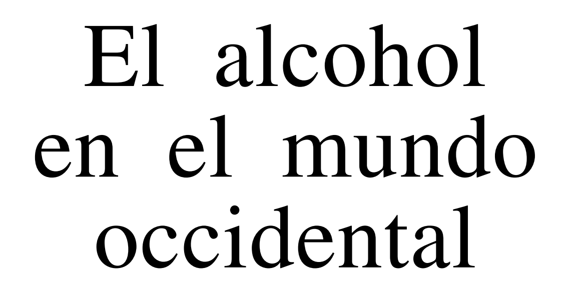
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GRAVITY GRADIOMETRY RESURFACES. Robin E. Bell, Roger N. Anderson y Lincoln F. Pratson, en *Leading Edge* (Society of Exploration Geophysicists), vol. 16, núm. 1, págs. 55-60; enero de 1997.

THE RISE AND FALL OF EARLY OIL FIELD TECHNOLOGY: THE TORSION BALANCE GRADIOMETER. Robin E. Bell y R. O. Hansen, en *Leading Edge*, vol. 17, núm. 1, págs. 81-83; enero de 1998.

La *home page* en Internet de Bell Geospace está en http://www.bell-geo.com.

El Museo Virtual de Eötvös está en http://www.elgi.hu/museum/index.htm de Internet.



El alcohol en el mundo occidental

Considerado hoy agente patológico, el alcohol esconde una historia harto compleja

Bert L. Vallee

Igual que una persona, también una sustancia podría mostrar aspectos distintos, contradictorios incluso, de su realidad. Poliédrico es el alcohol etílico. Podemos acercarnos al mismo desde planteamientos muy dispares: promotor de la sociabilidad, acompañante en la mesa, beneficioso para la salud cardiovascular o factor de destrucción del individuo.

Sin embargo, a lo largo de una parte extensísima de la historia de nuestra civilización, el alcohol ha desempeñado un papel muy distinto. En buena parte de los últimos 10.000 años, la alcohólica fue verosímilmente la bebida diaria más popular, fuente indispensable de líquidos y calorías. En un mundo donde el suministro de agua estaba contaminado y era peligroso, el alcohol se ganó con razón el calificativo que le dieron los medievales: *aqua vitae*, "agua de vida".

Existe una prueba contundente que nos revela la influencia del alcohol en la sociedad, influencia que hoy en día resulta inimaginable. Me refiero a la declaración, pronunciada en 1777 por Federico el Grande de Prusia, cuya economía se veía amenazada por la importación de café: "Es repugnante reparar en el aumento de la cantidad de café consumido por mis súbditos, y la cantidad de dinero que, por ese motivo, sale del país. Todo el mundo toma café; hay que acabar con esa costumbre. Su Majestad fue criado con cerveza, y así lo fueron también sus antepasados y oficiales. Muchas han sido las batallas guerreadas y ganadas por soldados vigorizados con cerveza, y el Rey no cree poder confiar en soldaditos que toman café para afrontar las adversidades en el supuesto de otra guerra."

Si hoy algún gobernante propugnase el consumo de alcohol por encima del de café, especialmente en la milicia, pondríamos en tela de juicio su salud mental. Pero basta retroceder unas líneas en el libro de la historia para encontrarnos con un monarca que habla de la cerveza como si se tratara de la leche materna. En efecto, podría haber sido éste el papel nutricional representado por el alcohol desde los orígenes de Occidente hasta la instalación de sistemas de abastecimiento de agua seguros para pueblos y ciudades, lo que no ocurrió hasta el siglo pasado.

Durante millones de años los procesos naturales han producido artículos alimenticios que contienen alcohol. La levadura, al metabolizar el azúcar para extraer energía, rinde alcohol etílico como subproducto secundario. Los propios animales consumen alcohol de forma accidental al ingerir fruta "estropeada" en pleno proceso natural de fermentación; se habla de aves y mamíferos ebrios.

1. LA CIVILIZACION OCCIDENTAL tuvo en la cerveza y el vino, a lo largo de los últimos diez milenios, una fuente importante para satisfacer su demanda nutritiva y de líquido. Antes del muy reciente acceso al agua limpia y saneada, las bebidas alcohólicas fueron, sin duda, los únicos líquidos seguros.

BERT L. VALLEE se doctoró en medicina en 1943 por la Universidad de Nueva York e impartió clases en el Instituto de Tecnología de Massachusetts antes de integrarse en el claustro docente de la Facultad de Medicina de Harvard. Desempeña ahora la cátedra Edgar M. Bronfman en dicha institución.

Los humanos cuentan con un gen que determina la enzima alcohol deshidrogenasa; la presencia del gen refuerza la tesis según la cual, en el curso de la evolución, los animales se fueron encontrando con el alcohol en cuantía suficiente para haber desarrollado una vía metabólica del mismo. Hasta hace unos 10.000 años, la ingesta de alcohol por nuestros antepasados fue espontánea o fortuita.

Por aquella época, algún goloso de la Edad de Piedra Tardía debió de probar el contenido de un tarro de miel que había quedado olvidado durante más tiempo del acostumbrado. Se había producido ya la fermentación natural, y el catador, al encontrar excitantes los efectos de la ingestión moderada de alcohol, volvería a repetir la experiencia. Los compañeros y alumnos de nuestro primer enólogo clasificaron luego el método para crear esas aguamieles o vinos, a partir de la miel, los dátiles o la savia. La técnica era harto sencilla: dejar la sustancia dulce abandonada a la fermentación.

La cerveza, que se saca de cereales con almidón, debería esperar hasta el origen y desarrollo de la agricultura. Los fértiles deltas fluviales de Egipto y Mesopotamia producían cosechas abundantes de trigo y cebada; la dieta de sus campesinos, obreros y soldados se apoyaba en los cereales. El descubrimiento del grano fermentado constituiría, pues, un acontecimiento inevitable en la historia. Como en el caso del vino, los experimentos naturales se encargarían de producir sustancias alcohólicas que despertaron el interés de los que probaban los resultados. No se había entrado en el tercer milenio antes de Cristo, y egipcios y babilonios bebían cervezas de cebada y trigo.

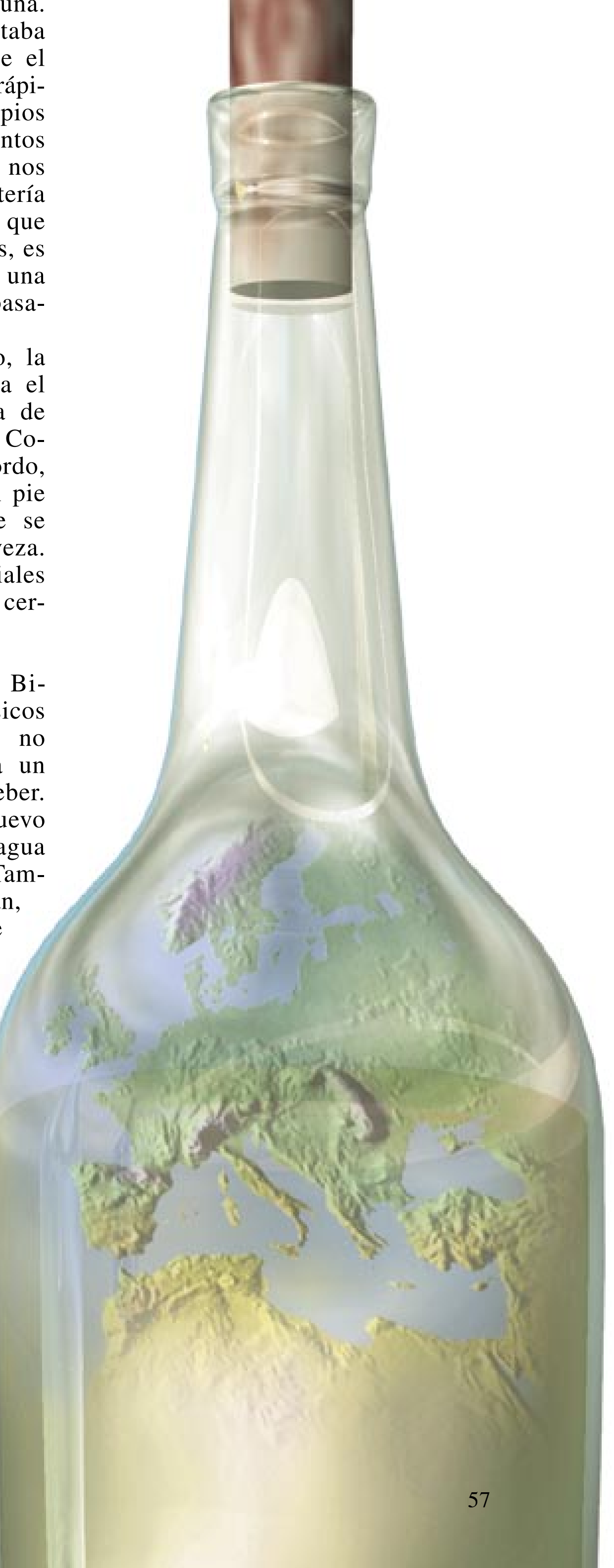
También el vino recibiría un impulso de la agricultura. La mayoría de los jugos de frutas, incluido el de uva silvestre, son, por naturaleza, demasiado bajos en azúcar para producir vino. Pero la selección de las uvas más dulces que desembocó en la domesticación de tipos de cepas terminó por conducir a la vinicultura. El cultivo de la vid para elaboración de vino se atribuye a los habitantes de Armenia, alrededor del 6000 a.C.

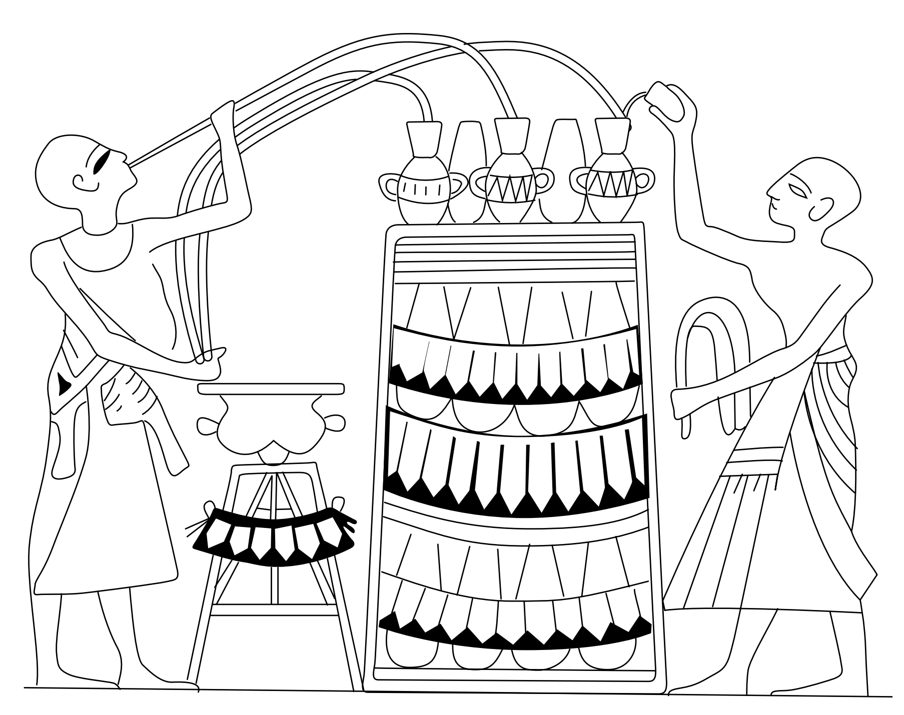
La práctica de la agricultura trajo consigo un excedente de alimentos, lo que a su vez llevó a que los individuos se agruparan en poblados, aldeas o ciudades. Estos municipios se enfrentaron a un problema que todavía persiste: proveer a los habitantes con suficiente agua limpia y saneada para hacer frente a su demanda fisiológica. Hasta el siglo XIX no se dio solución alguna. Beber agua en esa época resultaba peligroso, mortal incluso, porque el medio de abastecimiento acababa rápidamente contaminado por los propios desechos. Nunca sabremos cuántos murieron por beber agua. Si nos fijamos en las crisis de disentería y de enfermedades infecciosas que hoy provocan aguas contaminadas, es apostar sobre seguro afirmar que una notable porción de nuestros antepasados sucumbieron por su culpa.

Es más, hasta no hace mucho, la escasez de líquidos seguros para el consumo fue decisiva a la hora de evitar viajes oceánicos. Cristóbal Colón hizo su viaje con vino a bordo, y los Padres Peregrinos pusieron pie en Plymouth Rock sólo porque se agotaron sus reservas de cerveza. Pronto fueron razones comerciales las que atrajeron a los maestros cerveceros a las colonias.

La lectura atenta de la Biblia y los textos griegos clásicos ofrece un testimonio negativo; no aparece nada que se parezca a un uso generalizado del agua para beber. Ni en el Antiguo ni en el Nuevo Testamento apenas se alude al agua entendida como bebida común. Tampoco los textos griegos se prodigan, salvo su juicio favorable sobre la calidad de los manantiales de las montañas. Hipócrates citó, en concreto, la fiabilidad del agua de manantial y de pozo hondo, agua ésta de lluvia recogida en cisternas. A través de una experiencia trágica, sin la menor duda, nuestros antepasados comprendieron que el agua a su alcance era, en buena medida, inapropiada para el consumo.

Para una civilización occidental naciente, con un suministro de agua a evitar, el alcohol etílico constituiría su leche materna. Cerveza y vino se hallaban exentos de agentes patógenos. Y el poder antiséptico del alcohol, sumado a la acidez natural del vino y de la cerveza, mataban muchos patógenos cuando la bebida alcohólica se diluía en agua. Por ello, desde los tiempos de la aplicación controlada y consciente del proceso de fermentación, la gente de toda edad empezó a consumir cerveza y





2. LAS PINTURAS EGIPCIAS muestran el carácter esencial del alcohol en la vida de la nobleza. Esta ilustración que representa la mezcla de vinos pertenece a la tumba de Amanemhat, alrededor del 1400 a.C.

vino, que no agua, para satisfacer su requerimiento diario de líquidos.

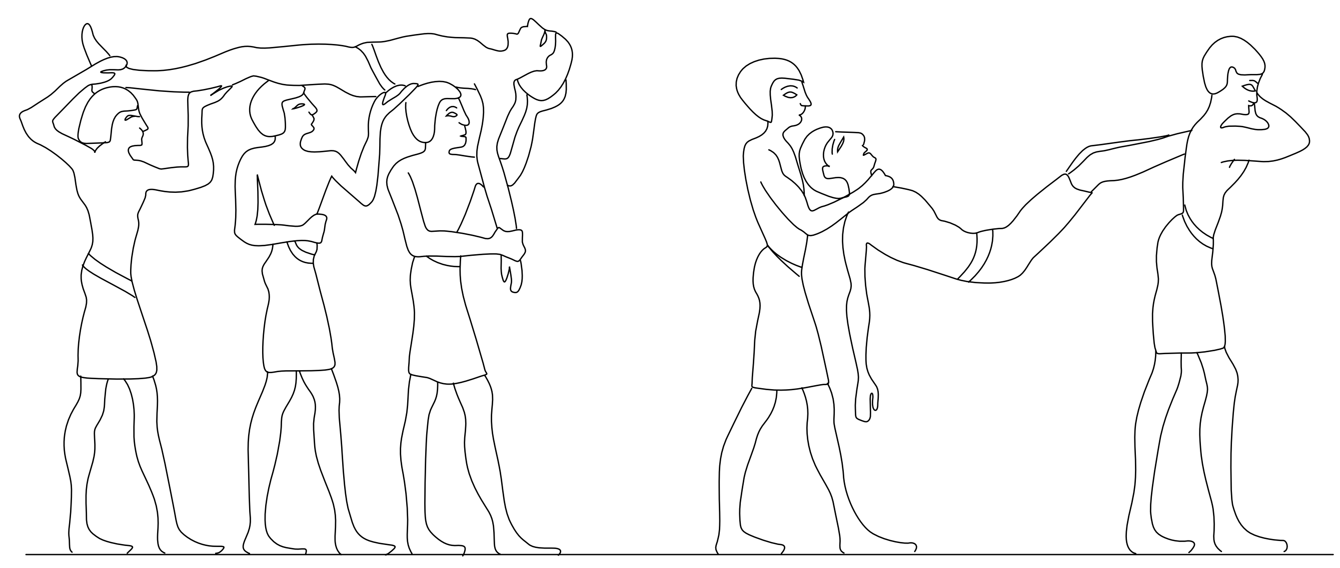
Las tablillas de arcilla babilónicas, con más de 6000 años de antigüedad, traen recetas de cerveza acompañadas de ilustraciones. El *akratidzomai* griego, que dio en significar "desayunar", se traduce literalmente por "beber vino sin diluir". Según se desprende, en el desayuno se aderezaba con vino el pan; la expresión "pan y cerveza" denotaba un producto de primera necesidad, nuestro "pan y mantequilla".

En el Lejano Oriente, las cosas discurrieron por otro cauce. Hace al menos 2000 años, la práctica de hervir el agua, para preparar el té, creó un suministro potable de bebidas no alcohólicas. Además, la genética ayudó a librarles del alcohol: aproximadamente la mitad de la población asiática carecen de una enzima necesaria para llevar a término el metabolismo del alcohol, por cuya razón su consumo les resulta bastante doloroso. En consecuencia, la cerveza y el vino se consolidaron sólo en las sociedades occidentales, donde permanecieron hasta finales del siglo pasado.

La producción tradicional de cerveza y vino a través de la fermentación de cereales, uva u otros frutos, originaba bebidas de bajo contenido alcohólico, en comparación con los que, hoy en día, les son familiares a los consumidores. Las bebidas también contenían grandes cantidades de ácido acético y otros ácidos orgánicos generados durante la fermentación. Con toda probabilidad, la mayoría de los vinos de tiempos remotos turbarían el olfato de un enólogo moderno; esos vinos elaborados a la antigua y embotellados en botellas nuevas se asemejarían al vinagre actual, con algún vestigio de sidra, más que a un cariñena galardonado.

Como el contenido en alcohol de la bebida era bajo, los consumidores no concedían a la embriaguez la importancia otorgada a las cuestiones de paladar, apaciguamiento de la sed, satisfacción del hambre y almacenamiento. Con todo, los "efectos secundarios" de esta constante ingesta de baja gradación serían casi universales. Es más, a lo largo de la historia occidental el estado mental considerado normal puede haber sido el de embriaguez.

El valor calórico de las bebidas alcohólicas no perecederas ocupó



3. DURANTE MILENIOS, las juergas de los borrachos han estado acompañadas por la presencia de bebidas alcohólicas. Esta ilustración correspondiente a la tumba de Khety, sobre el 2100 a.C., muestra a unos invitados que son retirados de un banquete tras haber bebido demasiado vino. A pesar de que la bebida llevada a un exceso era, y sigue siendo, una práctica poco saludable, lo cierto es que hace 4100 años la ingesta de cualquier cantidad de agua resultaba con toda probabilidad una aventura mucho más arriesgada.

también su lugar en la satisfacción de la demanda diaria de energía en sociedades mal alimentadas. Además, aportaban micronutrientes esenciales, tales como vitaminas y minerales.

En la mayoría de las culturas, el alcohol servía para distraer la fatiga y el aburrimiento entumecedor de la vida diaria, al tiempo que aliviaba dolores irremediables. Hoy disponemos de un sinfín de alternativas prácticas contra el dolor y el malestar. Hasta nuestro siglo, el único analgésico al alcance de todos era el alcohol. Del Libro de los Proverbios procede esta prescripción médica: "Dale bebida fuerte a él, que está a punto de perecer, y dales vino a ellos, que se hacen los valientes. Déjale beber y olvidar su pobreza, y abandonar para siempre su miseria." Se suele citar una tablilla cuneiforme sumeria de una farmacopea fechada sobre el 2100 a.C. para indicar el registro más antiguo conservado relativo al alcohol medicinal, si bien es probable que los papiros egipcios precedieran a esta tablilla. La terapéutica de Hipócrates privilegia el vino entre los remedios contra dolencias agudas o crónicas. La Escuela de Medicina de Alejandría apoyaba el uso médico del alcohol.

Las bebidas de las sociedades antiguas deben de haber sido mucho más bajas en alcohol de lo que lo son sus versiones actuales, pero ya entonces se era consciente de los potenciales efectos perniciosos que sobre el comportamiento tenía la bebida. Las culturas hebrea, griega y romana apelaban a la templanza, llamamiento reiterado a lo largo de la historia. El Antiguo Testamento desaprueba la embriaguez. El profeta Esdras y sus sucesores integraron el vino en el ritual hebreo cotidiano, con la presumible intención de moderar la costumbre de beber sin tiento, creando así un tipo de prohibición inspirada y controlada por la religión.

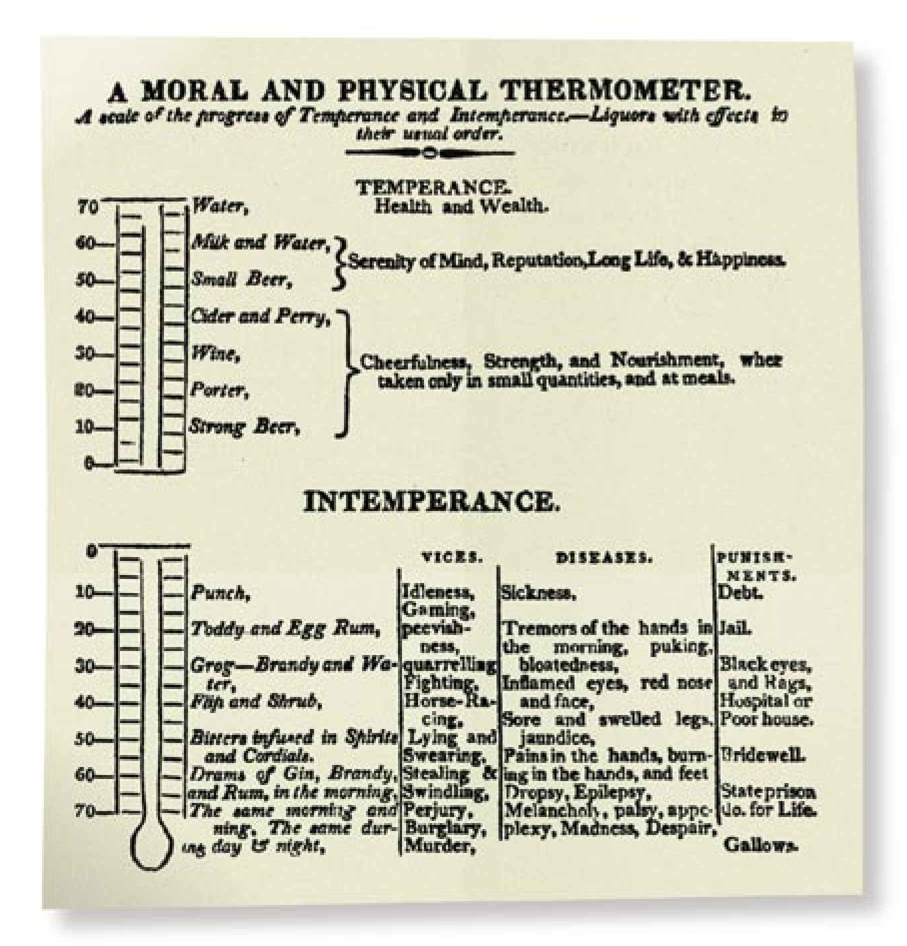
En el Nuevo Testamento Jesús sancionó el consumo de alcohol; hizo el milagro de la transformación del agua en vino, un acto en el que podría reconocerse la bondad sobre la naturaleza contaminada del agua. Sus discípulos dictaron medidas para procurar un equilibrio entre el uso y el abuso del vino, pero nunca apoyaron la prohibición total. San Pablo y los Padres Apostólicos insistieron en esa línea de moderación. En vez de enquistarse en la censura del vino por sus efectos sobre la compostura, lo consideraron un regalo de Dios, tanto por sus cualidades medicinales como por el alivio que aportaba frente la angustia de la vida diaria y el dolor.

Tradicionalmente, la cerveza ha sido la bebida del pueblo llano, mientras que el vino estaba reservado a las clases pudientes. No obstante, el vino de uva se convirtió en artículo asequible para el romano medio tras un siglo de expansión de los viñedos, que terminó alrededor del 30 a.C., auge éste derivado del mayor provecho obtenido del cultivo de la vid que el de los cereales. El aumento de la producción conllevó la caída de los precios, y el romano pudo brindar en la taberna con vino. La viticultura romana se hundió con el imperio. Tomaron el testigo la Iglesia y sus monasterios, las únicas instituciones con recursos suficientes para mantener la producción.

Durante casi 1300 años la Iglesia sacó un óptimo rendimiento del cultivo de extensos viñedos de la mejor calidad. A lo largo de la Edad Media los cereales constituyeron el principal alimento de los campesinos y la cerveza su bebida habitual, junto con el aguamiel y los vinos o las sidras



4. LA DESTILACION creó bebidas alcohólicas de una potencia sin precedentes. Este alambique apareció en el *Liber de arte distillandi* de Hieronymus Brunschwig, primera obra publicada sobre la materia, en el 1500. El libro destacaba los atributos del alcohol destilado: "Da buen color a la persona. Cura la calvicie... mata a los piojos y a las pulgas.... También proporciona coraje y le induce a desarrollar una buena memoria."



5. LA ANALOGIA del termómetro fue un intento de Benjamin Rush para explicar los efectos del alcohol. Incluso después de comprender que el abuso del alcohol era una enfermedad, reconoció que la bebida en cantidades moderadas resultaba beneficiosa, según se recoge en la sección "Templanza" de su esquema.

de producción casera. Los escasos críticos contra el consumo de alcohol quedaron acallados ante la falta clamorosa de alternativas seguras. Y, pese a las transiciones de regímenes políticos, sistemas religiosos y modos de vida, el uso y la opinión que se tenía en Occidente de la cerveza y del vino continuaron sin cambios apreciables. Pero el desarrollo técnico alteraría las relaciones entre alcohol y humanidad.

Tras unos 9000 años de experiencia en el consumo de aguamiel, cerveza y vino con un nivel de alcohol bajo, Occidente se encontró con un alcohol de alta concentración, gracias a la destilación. Desarrollada alrededor del 700 de la Era Cristiana por alquimistas árabes (para quienes *al kohl* significaba la esencia básica de un material), la destilación provocó uno de los primeros cambios significativos en cuanto a la magnitud y al modo del consumo de alcohol desde los comienzos de la civilización. A pesar de que las levaduras producen alcohol, sólo son capaces de tolerar concentraciones aproximadas de un 16 %. Las bebidas fermentadas presentaban, pues, una graduación natural máxima. La destilación sortea esos límites de la naturaleza al aprovechar los 78 grados Celsius que requiere el alcohol para llegar al punto de ebullición, en comparación con los 100 grados C del agua. Al hervir una mezcla de agua y alcohol, se desprende más vapor de alcohol que de agua. La condensación de este vapor forma un líquido con un nivel de alcohol muy superior al de la mezcla inicial.

El método árabe se extendió por toda Europa (antes de que el Islam adoptara por costumbre la abstinencia). La destilación del vino para producir licores empezó en el continente alrededor del 1100 de la Era Cristiana. El foco de irradiación se situó en la escuela médica de Salerno, capital de la transmisión —desde Asia Menor hacia Occidente— de teorías y métodos médicos y químicos. Junto al vino y la cerveza, tradicionales bebidas alcohólicas que tenían una concentración de alcohol baja y un rendimiento nutritivo positivo, había bebidas con los suficientes niveles de alcohol como para causar los problemas que, todavía hoy, padecemos. Había empezado la era de los destilados.

El conocimiento de la destilación se fue propagando gradualmente hacia el norte de Europa. En el año 1500, Hieronymus Brunschwig, médico alsaciano, describió el proceso en el *Liber de arte distillandit*, primera obra impresa sobre la destilación. Para cuando la obra de Brunschwig empezaba a difundirse con éxito, el alcohol destilado se había ganado ya su fama doble: por un lado, era alimento nutritivo y medicina beneficiosa, por otro una droga dañina. La afición generalizada a los licores anduvo uncida a los azotes epidémicos del siglo XIV, en particular, la Peste Negra de 1347-1351. Pese a su absoluta ineficacia terapéutica contra la peste, el alcohol lograba al menos que la víctima se sintiera más fuerte. Ningún otro agente conocido podría haber logrado tanto. El optimismo de los médicos para con los aguardientes puede atribuirse a esa capacidad suya para aliviar el dolor y levantar la moral, efectos que revestirían un interés notabilísimo en la crisis médica en que se vio sumergida, en el intervalo de una sola generación, los dos tercios de la población europea.

La recuperación económica subsiguiente a la regresión de la epidemia en Europa generó nuevas pautas de refinamiento y urbanización creciente. Se asistió a una ostentación sin precedentes, a un hedonismo desenfrenado. Europa, en apariencia aliviada por haber superado la peste del siglo XIV, se encaminó hacia una suerte de borrachera continental. Pese a los obvios efectos nocivos de la embriaguez, y no obstante los intentos de las autoridades por acabar con la bebida, la práctica continuó hasta comienzos del siglo XVII, en que se popularizaron las infusiones preparadas con agua hervida. El café, el té y el cacao empezaron a romper el firme monopolio del alcohol.

El creciente sentimiento de antagonismo hacia el alcohol, alimentado en Gran Bretaña por cuáqueros y metodistas, careció, en el siglo XVIII, de eficacia y apoyo popular. Después de todo, el río Támesis era, en esos tiempos, una fuente de agua tan peligrosa como lo habían

6. EL AUXILIAR DE MUJERES de la Liga Keeley apoyaba la “Cura de Oro” de Keeley, quien, a finales del siglo XIX, sostenía que remediaba el alcoholismo. El Dr. Leslie Keeley proclamaba que las sales de oro, en efecto, acababan con las ansias de un alcohólico por la bebida. Pero su talento radicaba en la propaganda, no en la bioquímica. Cualquiera que fuera el éxito de Keeley, el Auxiliar de Mujeres pudo tener su parte de responsabilidad, al proveer una red de apoyo social a cuantos alcohólicos luchaban por superar su adicción. Keeley murió en 1900 y, con él, su cura.



sido los arroyos contaminados de la antigüedad. La disentería, el cólera y el tifus, todos derivados de las aguas sucias, eran epidemias devastadoras; así continuaría en Occidente hasta finales del siglo XIX, que rivalizó con la peste en letalidad demográfica.

Sólo el descubrimiento de los microorganismos como agentes de enfermedades y la obligación de la filtración y el tratamiento de las aguas de la red pública consiguieron convertir en potable el agua. El sentimiento religioso contrario al alcohol y la aparición del agua potable, combinados con un tercer factor, conseguirían que, al fin, un insignificante porcentaje de la población se alejara del alcohol. Este otro factor consistía en reconocer el carácter patológico de la adicción.

A lo largo del siglo XIX, la práctica científica de la medicina permitió la categorización de ciertos síntomas clínicos en enfermedades que, a partir de ese momento, empezarían a entenderse sobre una base racional. Entre los primeros problemas médicos abordados desde ese planteamiento estaba el abuso del alcohol. Debemos a dos médicos formados en Edimburgo, Thomas Trotter y Benjamin Rush, la primera aportación importante; consideraron el alcoholismo una enfermedad crónica y una amenaza para la vida. Es posible que su moral metodista, contraria al alcohol, guiara su investigación clínica; pero su trabajo fue impecable.

En un ensayo realizado en 1813 sobre la embriaguez, Trotter describió el abuso del alcohol como una enfermedad; expuso que el consumo habitual y prolongado de licores fuertes dañaba el hígado y resultaba en ictericia, desgaste y disfunciones mentales, patentes incluso en estado de sobriedad del paciente. Rush publicó ideas similares en América, y con mayor trascendencia, siendo como era un personaje público y signatario de la Declaración de Independencia. Su prestigio personal, más allá de su correcto diagnóstico sobre un mal social, ayudó a crear puntos de vista que culminaron, andando el tiempo, en la Prohibición Americana (1919-1933).

Los estudios del siglo XIX perfilaron el cuadro clínico y la base patológica del abuso del alcohol. Hoy representa uno de los problemas de salud más graves en todo el mundo. Sólo en Estados Unidos provoca 100.000 muertes anuales y es la tercera causa principal de mortandad evitable, tras el tabaco y las condiciones derivadas de una dieta pobre y de un *modus vivendi* sedentario. Decenas de millones tienen su vida desestructurada por culpa del alcohol.

Es muy alto el porcentaje de individuos que han experimentado los efectos del abuso del alcohol a través de algún miembro familiar. Los hijos de madres bebedoras nacen privados de su potencial, al venir al mundo bajo los signos físicos y las carencias intelectuales asociadas al síndrome fetal de alcoholemia en su fase más desarrollada; miles de niños más sufren efectos menores. Salvo la abstinencia absoluta, no hay tratamiento eficaz contra el alcoholismo.

Sin embargo, la sociedad y la ciencia están en el umbral de nuevas estrategias farmacéuticas y de comportamiento para combatir el alcoholismo. Al igual que con cualquier otra enfermedad, social o individual, importa dar con el diagnóstico correcto. Visto en retrospectiva histórica, al alcoholismo se le ha venido considerando una enfermedad; nos queda todavía que batallar con el alcohol concentrado, un fenómeno reciente en términos históricos. En cuanto atinemos con el diagnóstico, podremos confiar en que la investigación aporte tratamientos eficaces fundados en un mejor dominio de la fisiología de la adicción.

En cualquier momento de la historia, la humanidad queda inevitablemente atrapada en el tiempo, como un insecto en ámbar. Las costumbres, las tradiciones y las actitudes de una era imbuyen a los individuos que viven en esos tiempos, ofuscándolos, a menudo, cuando se trata de considerar alternativas. Hoy, el alcohol es, ante todo, una sustancia de relajación, de celebración y, lamentablemente, de destrucción masiva. Considerarlo agente principal del desarrollo de una cultura entera puede ser desconcertante, e incluso ofensivo para alguno. Por suerte, todo buen médico realiza un historial antes de intentar una cura.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ALCOHOL DEHYDROGENASE SYSTEM. H. Jörnvall, O. Danielsson, B. Hjelmquist, B. Persson y J. Shafqat en *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 372, páginas 281-294; 1995.

KUDZU ROOT: AN ANCIENT CHINESE SOURCE OF MODERN ANTIDIPSOTROPIC AGENTS. W. M. Keung y B. L. Vallee en *Phytochemistry*, vol. 47, n.º 4, páginas 499-506; febrero 1998.

PATIENTS WITH ALCOHOL PROBLEMS. P. G. O’Connor y R. S. Schottenfeld en *New England Journal of Medicine*, vol. 338, n.º 9, páginas 592-602; 26 de febrero de 1998.

Unificación y dualidad en teoría de cuerdas

Las teorías de cuerdas son las más firmes candidatas para lograr una descripción unificada de todas las interacciones fundamentales de la naturaleza. Constituyen, sin embargo, aspectos parciales de la teoría M

Luis E. Ibáñez Santiago

Uno de los objetivos codiciados por los físicos desde hace más de cien años es la consecución de una teoría final o unificada para todas las leyes de la naturaleza. Se trata de hallar una teoría que describa las leyes que rigen todas las interacciones fundamentales unificadas en su diversidad por un número pequeño de principios.

Ante este reto la primera pregunta que surge es si la naturaleza muestra o no interés en la unificación de sus leyes. La experiencia acumulada en los veinte últimos años permite decir que, efectivamente, hay una serie de pistas que indican la existencia de una unidad o relación entre las interacciones, pistas que sugieren una teoría unificada subyacente a todas ellas.

En este sentido, los intentos de Albert Einstein (1879-1955) de unificar la gravitación y el electromagnetismo en los últimos años de su vida fueron prematuros. En su época se desconocían las leyes físicas de las interacciones nucleares. En cambio a finales del siglo XX tenemos un buen punto de partida para intentar el salto hacia una unificación de todas las interacciones.

Los datos experimentales son consistentes con el modelo estándar. Describe éste tres de los cuatro tipos de fuerzas fundamentales: interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes. Estos dos últimos tipos de fuerza son interacciones sólo observables en el dominio nuclear o subnuclear.

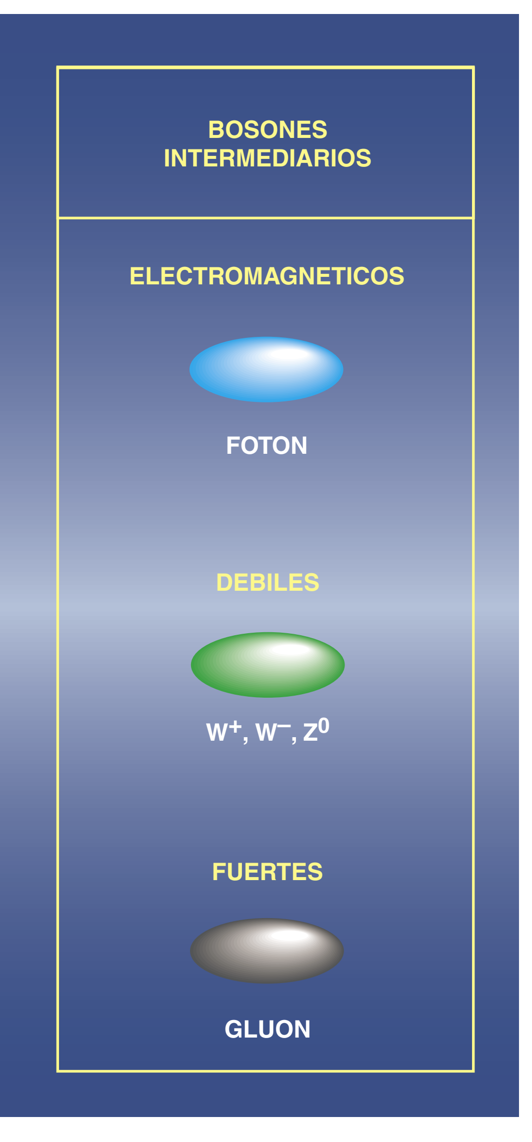
Las tres fuerzas vienen descritas mediante un formalismo matemático denominado teoría cuántica de campos. Este formalismo, construido en los años cuarenta y cincuenta, es un esquema general que incorpora los aspectos fundamentales de la mecánica cuántica y la teoría especial de la relatividad. En principio, pueden construirse una infinidad de teorías cuánticas de campos. Los datos experimentales obtenidos en los aceleradores de partículas elementales en los últimos cuarenta años han permitido estudiar cómo son las tres teorías cuánticas de campos que describen las interacciones electromagnéticas, fuertes y débiles. También hemos aprendido en los últimos treinta años

CONSTITUYENTES FUNDAMENTALES DE LA MATERIA

	QUARKS	LEPTONES
MATERIA USUAL	u (ARRIBA)	e (ELECTRON)
	d (ABAJO)	ν_e (NEUTRINO DEL ELECTRON)
MATERIA EXISTENTE A ALTAS ENERGIAS	s (EXTRAÑO)	μ (MUON)
	c (ENCANTO)	ν_μ (NEUTRINO DEL MUON)
	b (ABAJO)	τ (TAU)
	t (ARRIBA)	ν_τ (NEUTRINO DEL TAU)

que toda la materia conocida está constituida por quarks y leptones.

Las interacciones entre partículas elementales según estas teorías tienen lugar mediante el intercambio de otras partículas llamadas genéricamente bosones intermediarios. Así, un par de quarks interaccionan intercambiando energía en forma de un fotón, la partícula elemental asociada a la interacción electromagnética; pueden interaccionar débilmente mediante intercambio de bosones *W*, Z^0 (partículas mediadoras de la interacción débil), o fuertemente con intercambio de gluones (mediadores de la interacción fuerte). Hay otras muchas posibilidades de interacciones de formas más complicadas. El modelo estándar nos permite calcular y entender numéricamente las interacciones electromagnéticas, fuertes o débiles entre los constituyentes fundamentales de la materia.



Sin embargo, no contamos en este momento con una teoría cuántica de campos que describa las interacciones gravitatorias de las partículas. Cuando se intenta construirla nos encontramos con que, al efectuar los cálculos, se obtienen cantidades infinitas carentes de sentido: la teoría es inconsistente. En el argot se dice que la teoría es “no renormalizable”.

Esta situación es una ironía de la historia de la ciencia: la primera interacción fundamental de la naturaleza que empezó a entenderse con el advenimiento de la ciencia moderna en el siglo XVII fue la gravitación (Newton). Sin embargo, dicha interacción se resiste a una explicación en el contexto de la mecánica cuántica y va a ser la última en entenderse a nivel microscópico. Este es, sin duda, el gran problema que la triunfante física fundamental del siglo XX dejará pendiente para el siglo XXI. En los últimos quince años ha surgido una clase de teorías que constituyen, al parecer de muchos físicos, unas fuertes candidatas para la obtención de una teoría cuántica de la gravitación. Son las teorías de “supercuerdas”. Estas teorías no sólo parecen prometer una solución al problema de la gravitación cuántica, sino que constituyen, además, teorías unificadas de todas las interacciones de la naturaleza. Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, ha llegado a afirmar que las teorías de supercuerdas son un trozo de física del siglo XXI milagrosamente descubierto en el siglo XX.

Un primer obstáculo contra la idea de una teoría unificada es la disparidad entre las cuatro fuerzas en cuestión. Las interacciones fuertes son mucho más intensas que las electromagnéticas. Para que el lector se haga una idea intuitiva, son las interacciones fuertes las que están en juego en una explosión nuclear, mientras que en el caso de un explosivo como la dinamita se trata de interacciones electromagnéticas. Por otra parte, las interacciones débiles (causantes de la radiactividad) son mucho menos intensas que las electromagnéticas. Las gravitatorias son las más débiles de todas: es imposible notar la atracción gravitatoria entre dos objetos en la vida cotidiana. Sólo nos percatamos de la interacción gravitatoria cuando las masas consideradas son enormes y compensan la debilidad de la interacción. Tal es el caso del peso de los objetos en la superficie terrestre, producido por la enorme masa de la Tierra que compensa la debilidad de la interacción gravitatoria.

¿De qué modo pueden las cuatro interacciones, de intensidad y propiedades diferentes, formar parte de una misma teoría unificada? La respuesta se ha ido elaborando a lo largo de los últimos 30 años. El punto fundamental puede expresarse de la siguiente manera: la forma de las leyes fundamentales de la naturaleza depende de la energía en que se producen las interacciones. Esto quiere decir que, por ejemplo, las leyes que rigen el choque entre dos electrones cambian al hacerlo la energía con que chocan. No debe extrañar que el resultado de una colisión entre dos partículas dependa de la energía con que chocan (es manifiesto que el resultado de un golpe frontal de dos vehículos que marchan el uno contra el otro a 5 km/h difiere del resultado obtenido cuando van a 200 km/h). Lo sorprendente es que cambie la propia forma de las leyes fundamentales de la física. Esta idea abre la puerta a la posibilidad de una teoría unificada de las interacciones fundamentales.

Es posible, en efecto, que las interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles, cuyas intensidades y leyes difieren entre sí cuando se estudian a las energías asequibles en los laboratorios actuales, muestren un parecido creciente conforme vamos aumentando las energías. En ello estriba una de las razones principales por la cual los físicos de partículas elementales persiguen la construcción de aceleradores de partículas con cada vez mayor energía. No se trata sólo de estudiar el comportamiento del modelo estándar a mayores energías, sino, sobre todo, de descubrir si, a partir de cierta energía, cambian las leyes de la física.

La intensidad de las interacciones fuertes, electromagnéticas y débiles

1. TABLA DE LOS CONSTITUYENTES fundamentales de la materia. Toda la materia conocida está compuesta por seis tipos de quarks y seis de leptones. Los protones y neutrones de los átomos están constituidos por quarks *u* y *d*. Alrededor de los núcleos de los átomos orbitan los electrones, uno de los seis leptones existentes en la naturaleza. Las interacciones electromagnéticas, débiles y fuertes entre las partículas tienen lugar mediante el intercambio de otras partículas llamadas bosones intermediarios.

LUIS E. IBAÑEZ es profesor en la Universidad Autónoma de Madrid, donde se doctoró en 1978. Pasó ocho años en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN), en las cercanías de Ginebra. Ha trabajado en teorías unificadas, supersimetrías y supercuerdas. En marzo de 1997 recibió el premio Iberdrola de Ciencia y Tecnología.

viene medida por las constantes de acoplo, magnitudes numéricas de un valor aproximado de $^1/_8$, $^1/_{128}$ y $^1/_{24}$ respectivamente.

Utilizando las reglas de la teoría cuántica de campos se puede extrapolar y calcular cuáles serían dichas intensidades a energías más altas. Dicho cálculo fue realizado en 1974 por H. Georgi, H. Quinn y S. Weinberg, en la Universidad de Harvard. Mostraron que las constantes de acoplo de las tres interacciones se acercan a medida que aumenta la energía. La intensidad de las tres fuerzas se hace aproximadamente la misma a energías del orden de 10^{16} GeV (un GeV equivaldría a la energía liberada en un proceso ideal en que un átomo de hidrógeno se desintegrara en pura energía siguiendo la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$). Para estas energías altísimas, las tres interacciones se vuelven de intensidad comparable y bien pudieran corresponder a tres diferentes manifestaciones de un solo tipo de fuerza. La teoría unificada asociada sería rigurosamente válida a dichas energías e incluiría el modelo estándar como un caso particular. A energías inferiores a la de unificación, reaparecerían las tres interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas, diferenciadas.

La energía mayor que se puede alcanzar hoy en un acelerador de partículas es del orden de 1000 GeV. Necesitaríamos multiplicar por un billón dichas energías para poder estudiar en el laboratorio si acontece efectivamente tal unificación. Por muchas razones resulta inviable la construcción de un laboratorio de estas características; los físicos deben, pues, buscar pruebas indirectas de la existencia de una teoría unificada.

Sería extraño que se diera sólo unificación entre tres de las interacciones fundamentales de la naturaleza y la cuarta permaneciera al margen. La gravitación es la más débil de las cuatro interacciones. Ello se debe a la extrema pequeñez de la constante de la gravitación universal de Newton. Según es sabido, la teoría de la relatividad establece una equivalencia entre masa y energía; por tanto, otra forma de obtener interacciones gravitacionales grandes es estudiar procesos gravitatorios en presencia de muy altas energías (en vez de masas muy grandes).

Utilizando el valor conocido de la constante de Newton y rudimentos de la mecánica cuántica, se comprueba que la interacción gravitatoria se convierte en una fuerza de intensidad grande (comparable con las otras tres) para energías del orden de 10^{18} GeV. A esta escala de energías característica de la gravitación se le llama energía de Planck. La proximidad entre la energía de Planck (10^{18} GeV) y la de unificación de las otras tres fuerzas (10^{16} GeV) sugiere una unificación mayor dentro de una teoría superunificada que incluiría esta vez las cuatro interacciones. En esta "teoría del todo", las cuatro serían aspectos diferentes de una interacción fundamental única.

Aunque el esquema indicado parece sugerente, la teoría unificada de las cuatro interacciones está todavía por llegar. El hueso más duro estriba en la interacción gravitatoria: carecemos de una teoría cuántica de la gravitación. Lo ideal sería encontrar una teoría consistente de la gravitación que además fuese parte de una teoría unificada de las cuatro interacciones fundamentales.

Todo parece indicar que para afrontar este ambicioso programa se tendrá que ir más allá de las técnicas utilizadas con las otras tres interacciones (la teoría cuántica de campos). Las indeseadas, por inconsistentes, cantidades infinitas que aparecen cuando se aplican dichas técnicas a la interacción gravitatoria así lo aconsejan.

En este punto aparecen las teorías de cuerdas. Formuladas en los años sesenta y setenta, para describir las interacciones fuertes antes de que el modelo estándar quedara bien establecido, fracasaron en dicho intento. En 1974, J. Scherk, de la Escuela Normal Superior de París, y J. Schwarz, del Instituto de Tecnología de California, sugirieron su utilización como candidatas a teorías cuánticas de la gravitación.

Las teorías de cuerdas iban más allá de cualquier teoría precedente en un punto decisivo. Hasta entonces, todas las teorías suponían que las partículas elementales (quarks, leptones, etcétera) eran partículas puntuales, carentes de estructura interna ("elementales"). Las teorías de cuerdas postulan que los auténticos componentes fundamentales de la materia (al menos cuando se examina ésta a energías comparables con la de Planck) no son objetos puntuales (partículas), sino objetos extensos con estructura (cuerdas).

Se puede representar la idea de cuerda mediante dos puntos X_a y X_b unidos por una goma elástica. Una partícula que se mueve en el espacio describe una línea; una cuerda barre, al desplazarse en el espacio, una superficie. Puede haber cuerdas cerradas sobre sí mismas. La partícula tiene por magnitud característica su masa, *m*; la cuerda tiene, por magnitud característica de su inercia, la tensión de la cuerda, *T*. La tensión de las cuerdas se mide en unidades de energía, y se postula que *T* es del orden de la energía de Planck, 10^{18} GeV.

En física las nuevas teorías nunca aparecen destruyendo las existentes. Siempre consisten en extensiones de las teorías preexistentes; en cierto límite se recuperan de nuevo las teorías anteriores. Tal es el caso, por ejemplo, de la teoría especial de la relatividad, que no invalida la mecánica de Newton, sino que la complementa para el caso de cuerpos que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz. De igual manera, hay que exigir que en cierto límite las teorías de cuerdas den lugar de nuevo a la noción de partícula elemental.

Si representamos una cuerda abierta mediante dos puntos unidos por una cuerda elástica, la tensión de la cuerda *T* nos mide cuán fuerte es la "goma" que une los dos puntos. En una cuerda con una tensión muy grande, los puntos apenas se podrán separar; a todos los efectos, se recupera la noción de partícula elemental cuando la tensión de la cuerda se hace muy grande. Una cuerda no se distingue esencialmente de una partícula elemental, a no ser que se le comunique una energía enorme, del orden de *T* (10^{18} GeV). Sólo a esas energías la estructura no puntual de las cuerdas se hace manifiesta.

Hasta cierto punto, una cuerda equivale a un conjunto infinito de partículas elementales. De este infinito conjunto de partículas, todas salvo unas pocas tienen masas del orden de la energía de Planck. En la experiencia cotidiana no nos percatamos de la existencia de esta infinidad de partículas supermasivas porque las energías a nuestra dispo-

sición son ridículas comparadas con la energía de Planck. Aparte de estas partículas supermasivas inobservables, existen otras sin masa tan enorme. Son las que debemos identificar con las partículas del modelo estándar: quarks, leptones, fotones, etcétera; forman la materia observable en la vida cotidiana.

Pese a no ser directamente observables, la existencia de este conjunto de infinitas partículas supermasivas es crucial para obtener la propiedad más importante de las teorías de cuerdas. Confesábamos que no disponíamos de una teoría cuántica de la gravitación por culpa de la aparición de cantidades infinitas en los cálculos. Pues bien, estas torres de infinitas partículas cancelan justamente tales infinitos. Las teorías de cuerdas son las primeras teorías cuánticas consistentes de la gravitación. Y las únicas existentes. Para ser precisos, sólo las teorías de cuerdas que gozan de supersimetría —principio de simetría que trata por igual a bosones y fermiones— pueden cancelar los infinitos. Se les llama teorías de supercuerdas.

El que algunas teorías de cuerdas podrían solucionar el problema de los infinitos de la gravitación cuántica era sabido desde los trabajos de M. Green, del Colegio Queen Mary de Londres, y Schwarz a principios de los ochenta. Sin embargo sólo un número pequeñísimo de físicos teóricos trabajaban en este tema, pues las teorías de cuerdas entonces consideradas no parecían muy prometedoras en la unificación de las cuatro interacciones; se las presumía incapaces de describir, además de la gravitación, el resto de las interacciones.

Tampoco parecía posible reobtener el modelo estándar como un límite de la teoría de supercuerdas. Se conocían en aquella época tres tipos de teorías de supercuerdas: Tipo IIA, Tipo IIB y Tipo I. Los dos primeros eran teorías de cuerdas cerradas y bastante análogas entre sí, no obstante poseer dos versiones de supersimetría diferentes. Aunque abarcaban la fuerza gravitatoria, no se entendía cómo podrían obtenerse interacciones mediadas por bosones intermediarios cargados, como los que aparecen en el modelo estándar.

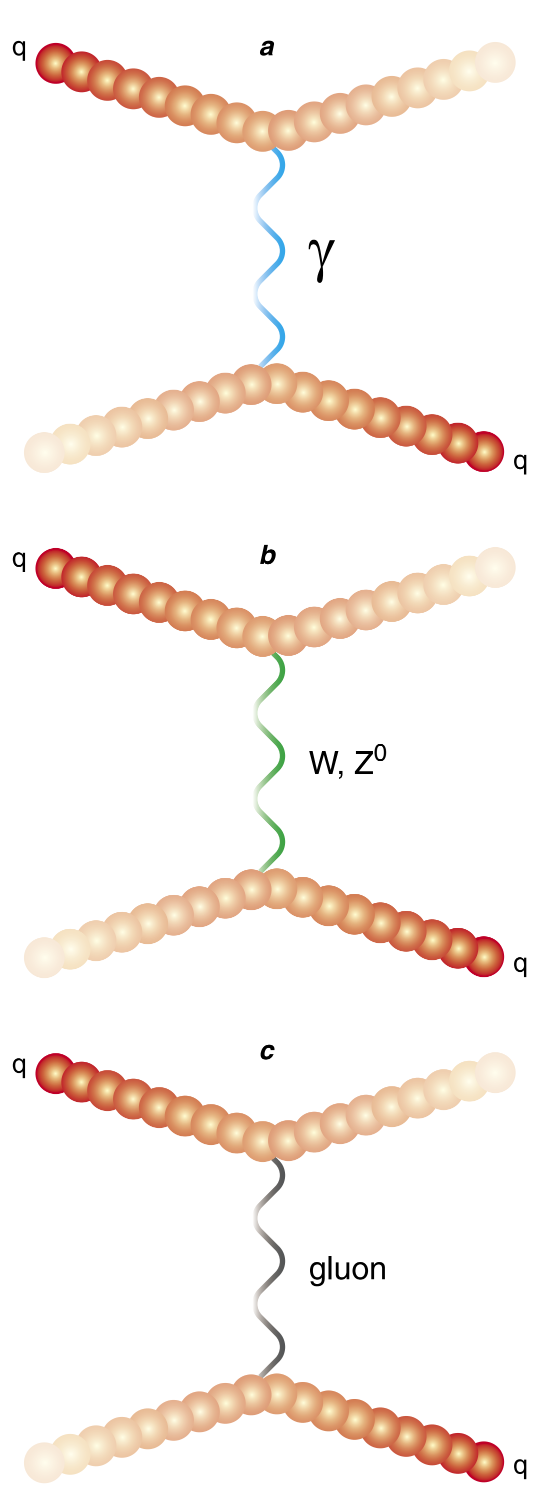
Las cuerdas Tipo I eran, en cambio, teorías de cuerdas cerradas y abiertas. Permitían tener interacciones de la clase deseada. Pero se vio en seguida que tales cuerdas Tipo I parecían inconsistentes con la mecánica cuántica; adolecían de anomalías.

El panorama cambió en 1984, cuando Green y Schwarz demostraron que las teorías de supercuerdas de Tipo I están libres de anomalías para determinada clase de interacciones con bosones intermediarios correspondientes a una simetría denominada $SO(32)$. Pocos meses después, D. Gross, J. Harvey, E. Martinec y R. Rohm, de la Universidad de Princeton, descubrieron dos nuevas teorías de cuerdas cerradas consistentes y sin anomalías; las bautizaron con los nombres de heterótica $SO(32)$ y heterótica $E_8 \times E_8$.

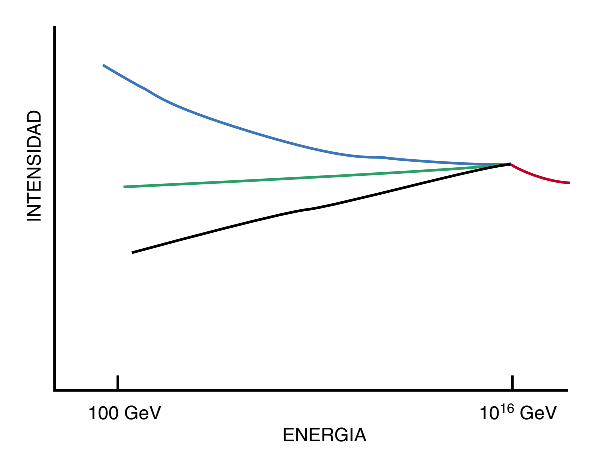
Lo mismo que en las cuerdas Tipo I con simetría $SO(32)$, esas dos nuevas teorías comprenden interacciones de tipo gravitatorio e interacciones con bosones intermediarios cargados, con simetrías denominadas $SO(32)$ y $E_8 \times E_8$, respectivamente; por tanto, podían contener, de una manera consistente, las otras tres interacciones fundamentales de la naturaleza, no sólo la gravitación. Semejante avance provocó que una avalancha de físicos teóricos se lanzaran de lleno al estudio de dichas teorías.

Para comienzos de 1985 se contaba ya con las cinco teorías de supercuerdas consistentes que conocemos: las cuerdas cerradas Tipo IIA, Tipo IIB, heterótica $SO(32)$, heterótica $E_8 \times E_8$ y las cuerdas Tipo I (que incluyen cerradas y abiertas). Las cinco teorías se hallan definidas en un espacio-tiempo insólito, con nueve dimensiones espaciales y una dimensión temporal. Si quisiéramos describir el universo físico conocido tomaríamos sólo las tres dimensiones espaciales usuales (arriba-abajo, derecha-izquierda, delante-detrás) más el tiempo.

Ya en los años veinte Theodor Kaluza y Oskar Klein explicaron que podría haber dimensiones extra más allá de las tres habituales en tanto en cuanto estas dimensiones adicionales estén curvadas sobre sí mismas y tengan un tamaño pequeñísimo, de suerte que en la vida cotidiana (o incluso con



2. INTERACCIONES entre partículas elementales. En *a*, se ilustra un par de quarks *q* en interacción electromagnética mediante intercambio de un fotón. Las interacciones débiles vienen mediadas por el intercambio de los bosones intermediarios W y Z^0 (*b*). Por fin, en *c* se muestra dos quarks que interaccionan fuertemente mediante el intercambio de un gluon.



3. A LAS ENERGIAS de los laboratorios actuales de física de partículas, las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas tienen intensidades diferentes. La teoría cuántica de campos nos permite estimar qué intensidades alcanzarían las tres fuerzas a energías mucho mayores. El resultado de este cálculo muestra que las tres interacciones tienen intensidades comparables a energías 100.000.000.000.000 de veces mayores que las que se obtienen ahora en los laboratorios. En la figura se ha representado la intensidad de cada una de las tres interacciones en función de la energía. La intensidad de las tres fuerzas se iguala a energías del orden de 10^{16} gigaelectronvolt. (Un Gev vendría a ser la energía liberada en un proceso ideal de desintegración de un átomo de hidrógeno en pura energía, de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$.)

el mejor microscopio o acelerador de partículas que uno pueda construir) sea imposible percatarse de la existencia de estas dimensiones adicionales. Al proceso físico por el cual seis de las nueve dimensiones espaciales de las supercuerdas se curvan sobre sí mismas tomando tamaños mínimos se le llama compactación.

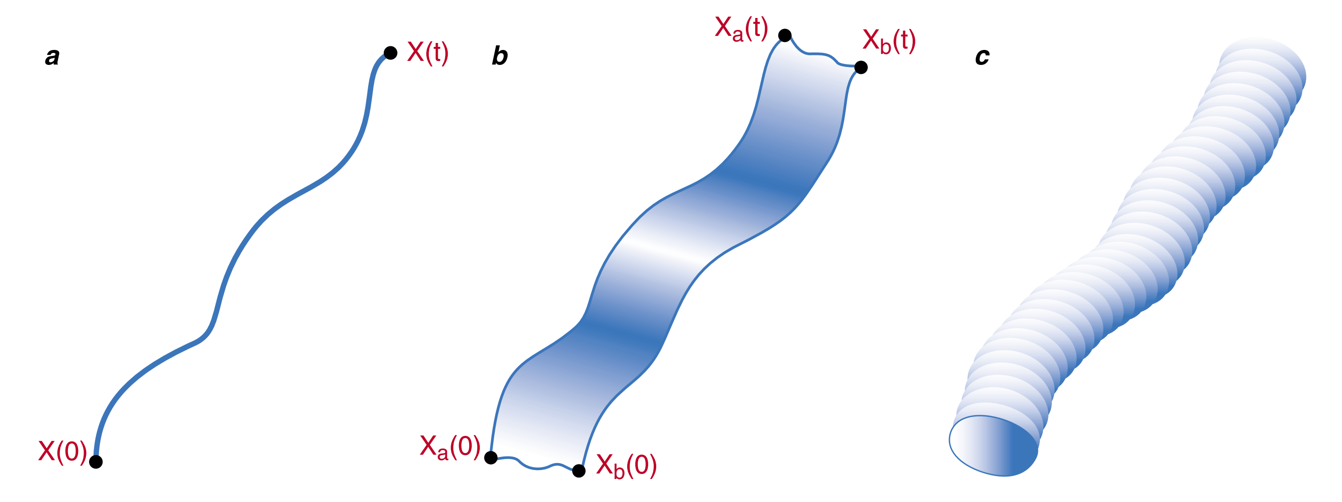
El fenómeno de la compactación presenta propiedades y consecuencias importantes. Existe una simetría llamada dualidad-T bajo la cual son equivalentes dos cuerdas cerradas con una dimensión compacta de radio R o 1/R (*véase el recuadro*). Cuando se aplica esta simetría de dualidad-T a las cinco supercuerdas, se encuentra una interesante unificación: la teoría Tipo IIA con una dimensión compacta con radio R es equivalente a la teoría Tipo IIB con una dimensión de radio $1/R$; hay, pues, una dualidad-T entre estas dos teorías. Igualmente se advierte que la cuerda heterótica *SO*(*32*) con una dimensión de radio R es T-dual a la otra cuerda heterótica $E_8 \times E_8$ con una dimensión de radio $1/R$. Vemos, por tanto, que, de las cinco supercuerdas existentes, la dualidad-T vincula dos pares de ellas y quedan sólo tres teorías independientes: Tipo I, Tipo II y heterótica.

En 1990 A. Font, D. Lüst, F. Quevedo y el autor de estas líneas propusimos la existencia de una nueva simetría de dualidad en la teoría de cuerdas: la dualidad-S (*véase el recuadro*). Ya hemos indicado que la intensidad de las interacciones se mide en términos de las constantes de acoplo. En teoría de cuerdas, la intensidad de las interacciones no viene dada por constantes numéricas, sino por una variable continua que lleva por nombre dilatón, ϕ. La dualidad-S es una simetría de la teoría bajo el intercambio de ϕ y $1/\phi$. Ello implica que una teoría que opere con interacción de intensidad débil (ϕ pequeño) equivale a la teoría que interaccione con fuerte intensidad, pues $1/\phi$ sería entonces grande. Se aprecia así una manifiesta analogía con la dualidad-T, salvo que ahora no se trata del radio R de una dimensión compacta, sino de la misma intensidad de las interacciones. Se trata de una equivalencia entre interacciones muy intensas y poco intensas.

La propuesta de la dualidad-S de 1990 fue acogida con interés, no exento de escepticismo. Sin embargo, los posteriores trabajos de A. Sen, del Instituto Tata de Bombay, y Schwarz, en los que verificaron que ciertos estados de monopolo magnético predichos por la dualidad-S existían en las ecuaciones para las cuerdas heteróticas, fueron disipando la reticencia.

Al cambiar la actitud de la comunidad científica hacia la existencia de dualidades entre acoplo fuerte y acoplo débil, conjeturas y desarrollos teóricos llevaron a la segunda revolución de la teoría de cuerdas en 1995 (la primera fue la de 1985).

Es difícil describir en orden cronológico todos los conceptos sobre teoría de cuerdas que han cambiado desde hace tres años. Nos limitaremos a exponer los resultados que



4. UNA PARTICULA en movimiento describe una línea según se desplaza (*a*). Una cuerda abierta de extremos X_a y X_b describe una cinta al moverse (*b*). Los extremos X_a y X_b tienden a unirse, debido a la tensión de la cuerda, y sólo cuando la cuerda tiene suficiente energía los extremos llegan a separarse. Una cuerda cerrada (*c*) describe, cuando se desplaza, un tubo.

Dualidad-T

El caso más sencillo de compactación es aquel en que una sola dimensión está curvada formando un círculo microscópico de radio *R*. Si *R* es suficientemente pequeño, no notaremos la existencia de esta dimensión. Consideremos ahora, por ejemplo, una de las cuerdas cerradas con esta dimensión compactada. Se puede ver que los posibles valores de los cuadrados de las energías *E* de las excitaciones de la cuerda en esta situación tendrán la forma:
donde *n* y *m* pueden tomar cualquier valor entero *m*,

$$E^2 = \frac{m^2}{R^2} + n^2T^4R^2$$

$n = 0, \pm1, \pm2$, etc. y *R* es el radio del circulo en el que está compactada la dimensión extra. *T* es la tensión de la cuerda.

En esta fórmula el primer término (proporcional a $1/R^2$) no es especial de teoría de cuerdas. La mecánica cuántica nos enseña que las energías de las partículas, cuando han de vivir en un espacio de tamaño finito, son múltiplos enteros del inverso del tamaño (*R*) de dicho espacio finito. Esto es análogo a las frecuencias de vibración de las cuerdas de una guitarra, que guardan también relación con la longitud de las cuerdas.

El segundo término (proporcional a R^2) es puramente *cuerdístico*, como revela el hecho de que aparezca la tensión de la cuerda *T*. Representa la posibilidad de que la cuerda cerrada esté enrollada *n* veces alrededor del círculo de radio *R* en que se halla curvada la dimensión extra. A mayor radio *R*, la cuerda enrollada mostraría a su vez tensión creciente; por tanto, la energía aumenta al hacerlo *R*, lo que revela la fórmula. Es como si tuviéramos enrollada una goma elástica alrededor de un cilindro cuyo radio aumentara: la goma sufriría una tensión progresiva (energía).

La fórmula presenta una curiosa propiedad de simetría observada por K. Kikkawa y M. Yamanaka en 1984. Para simplificar las cosas tomemos unidades de energía en las que se tenga $T = 1$. La fórmula sigue teniendo el mismo aspecto si hacemos el siguiente intercambio:

$$m \leftrightarrow n;\ R \leftrightarrow \frac{1}{R}$$

Desde un punto de vista matemático, esto es una mera curiosidad, pero desde un punto de vista físico la invariancia de la fórmula en este intercambio indica que las energías de las excitaciones de una cuerda, cuando hay una dimensión extra de radio *R*, es la misma que la de una cuerda cuando el radio es $1/R$. No ya las energías, sino todas las propiedades físicas de ambos sistemas, uno con una dimensión extra de radio *R* y otro con radio $1/R$, son exactamente las mismas. Una equivalencia que llama la atención, pues cuando *R* aumenta $1/R$ decrece; parece, en efecto, contradecir la experiencia de la vida diaria, que nos dice que las cosas pequeñas difieren de las grandes. Para una cuerda ello no es así. La simetría en cuestión constituye el caso más sencillo de lo que se ha venido en llamar dualidad-T.

Dualidad-S

En teoría de cuerdas la intensidad de las interacciones no viene dada por constantes numéricas, sino por una variable continua denominada dilatón, ϕ. Se pueden estudiar las ecuaciones e interacciones de una supercuerda (por ejemplo, la heterótica) con las seis dimensiones extra compactadas en círculos de radio *R* muy pequeños. Nos encontramos entonces con que *R* y ϕ aparecen de forma muy análoga en las ecuaciones. Ello parecería indicar algún tipo de parentesco entre *R* y ϕ. Sin embargo, no se ve a primera vista qué analogía pueda darse entre una cantidad *R* que mide el radio de una dimensión extra y una cantidad ϕ que mide la intensidad de las interacciones. Una posibilidad sugerente es que hubiera siete dimensiones extra, en vez de seis. En este caso la teoría en total tendría $7 + 3 + 1 = 11$ dimensiones espaciotemporales.

En tal situación el dilatón aparece como el radio R_{11} de la dimensión extra añadida. En ese marco cabría entender la similitud entre los valores *R* y el dilatón ϕ: este último sería otro radio R_{11} más. Si la analogía entre *R* y el dilatón ϕ fuese cierta, deberíamos admitir la existencia de una simetría en la que $\phi \leftrightarrow 1/\phi$, como ocurría con dualidad-T. Sin embargo, esta nueva hipótesis parece tener bastante más alcance que la dualidad-T. En efecto, si la teoría es invariante bajo el intercambio de ϕ y $1/\phi$, ello quiere decir que la teoría en interacción débil (ϕ pequeño) es equivalente a la teoría en interacción fuerte, pues $1/\phi$ sería ahora grande. Una sorprendente equivalencia entre interacciones muy intensas y poco intensas.

En 1975 Claus Montonen y David Olive, del CERN, habían considerado la posibilidad de una simetría análoga, aunque no en teoría de cuerdas. Estudiaban un tipo de teoría de campos en la que había a la vez partículas con carga eléctrica q_e normales (un electrón, por ejemplo) y partículas compuestas con carga magnética elemental q_m, los llamados monopolos magnéticos. Sugirieron que la física de cargas eléctricas con constante de acoplo grande era equivalente a la física de monopolos magnéticos con constante de acoplo pequeña. Esta dualidad de Olive-Montonen pasó inadvertida. En particular, la teoría por ellos considerada no parecía tener nada que ver con las teorías de las interacciones físicas conocidas.

Las analogías con dualidad-T y la existencia de estudios precedentes generalizándolo al caso con supersimetría parecía dar fuerza a la hipótesis de dualidad-S. Las analogías llegaban más lejos. En esas teorías con cargas eléctricas y magnéticas hay un tipo de partículas estables cuyas masas vienen expresadas así:

$$M^2 = q_e^2\alpha + \frac{q_m^2}{\alpha}$$

donde q_e y q_m son las cargas eléctrica y magnética de la partícula, respectivamente, y α representa la constante de acoplo que da la intensidad de la interacción. El primer término a la derecha de la ecuación corresponde a las partículas con carga eléctrica no nula y el segundo a las partículas con carga magnética no nula. Salta a la vista el parecido entre esta fórmula y la observada para la dualidad-T. En teoría de supercuerdas, en vez de α, se tiene el dilatón ϕ; los valores de q_e, q_m son números enteros.

Todos los argumentos y analogías mencionados nos llevaron a proponer en 1990 la existencia de una simetría en ciertas teorías de cuerdas bajo la cual se intercambia:

$$q_e \leftrightarrow q_m;\ \phi \leftrightarrow \frac{1}{\phi}$$

De nuevo, y de forma totalmente análoga al caso de dualidad-T, la fórmula para las masas de estas partículas queda invariante bajo la nueva dualidad.

guardan una relación más directa con la unificación entre teorías de cuerdas. En este contexto los trabajos pioneros de M. Duff, P. Townsend y C. Hull, sistematizados y completados por E. Witten en 1995, fueron muy importantes.

Las nuevas dualidades-S reducen el número de teorías independientes. Las cuerdas Tipo I son duales-S a la cuerda heterótica *SO*(32). Es decir, una cuerda Tipo I con acoplo ϕ pequeño es equivalente a la cuerda heterótica *SO*(32) con acoplo 1/ϕ (acoplo grande). Esta dualidad es quizá la menos sorprendente, pues en ambas teorías los bosones intermediarios poseen la misma simetría *SO*(32). Por consiguiente, hay en total dos teorías de cuerdas independientes: Tipo II y heterótica; las demás son duales-T o son duales-S a estas dos.

No acaban aquí las relaciones entre teorías. Se ha descubierto que la teoría IIB es S-dual a sí misma, es autodual. La teoría IIA, sin embargo, presenta una sorpresa: con acoplo débil es una teoría de cuerdas en 10 dimensiones, pero conforme aumenta el acoplo se revela una dimensión espacial extra desconocida, y se pasa a una teoría en 10 + 1, es decir, 11 dimensiones. La teoría IIA corresponde a una teoría en 11 dimensiones, en la que una de las dimensiones espaciales queda compactada en un círculo de radio $R_{11} = \phi$. Cuando el acoplo ϕ es pequeño, el tamaño de la dimensión extra R_{11} resulta muy pequeño y la teoría es aproximadamente de 10 dimensiones. Si queremos estudiar la teoría IIA con acoplo ϕ grande, el radio R_{11} crece, la dimensión extra se torna visible y pasamos a una teoría en 11 dimensiones. He aquí, pues, un nuevo fenómeno sorprendente: según la intensidad de las interacciones (acoplo ϕ grande o pequeño) aparecen o desaparecen dimensiones espaciales extra.

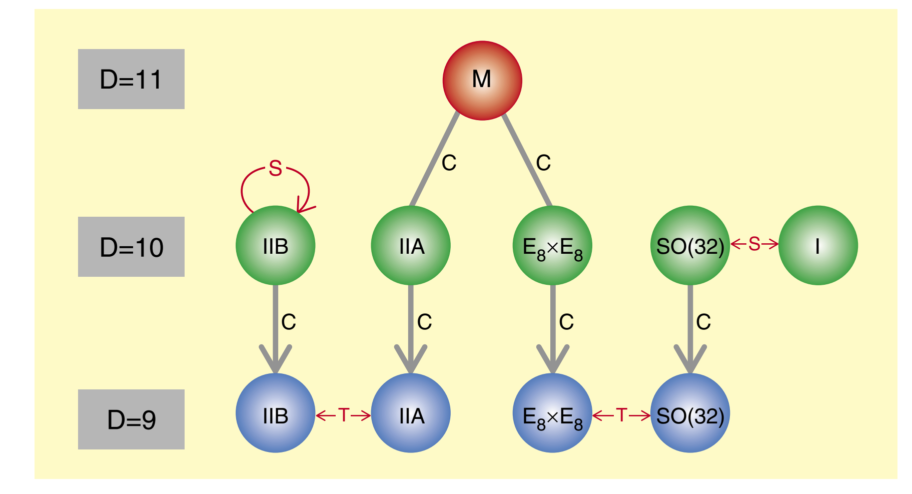
5. SI TUVIERAMOS UNA LUPA IDEAL capaz de ver la estructura extensa (*cuerdística)* de las partículas elementales como los quarks, observaríamos que los procesos mostrados en la figura 2 tienen el aspecto ofrecido en esta figura. Quarks y bosones intermediarios corresponden a cuerdas vibrando.

Queda por responder a la misma pregunta, aunque aplicada a la cuerda heterótica. Consideremos la cuerda heterótica $E_8 \times E_8$. Sabemos que, para acoplo ϕ pequeño, es una teoría de cuerdas en 10 dimensiones. Cuando el acoplo ϕ aumenta, se manifiesta algo muy parecido al caso Tipo IIA, según observaron en 1995 Horava y Witten. Al aumentar el acoplo ϕ se revela la existencia de una dimensión extra de radio $R_{11} = \phi$ que aumenta con ϕ. La única diferencia respecto a la teoría Tipo IIA estriba en que la dimensión extra no está enrollada en una circunferencia, sino que se trata de un segmento de longitud R_{11} con dos extremos.

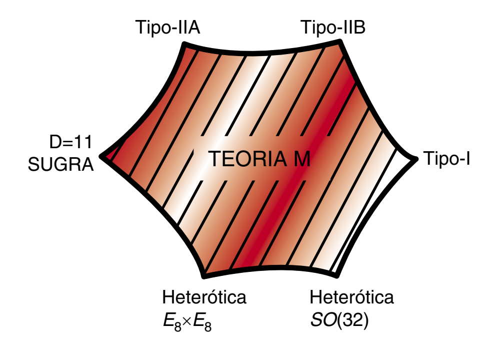
En la teoría Tipo IIA y en la heterótica $E_8 \times E_8$ cuando el acoplo ϕ se hace grande se obtiene una teoría en 10 + 1, o sea, en 11 dimensiones. La dualidad-T conecta estas dos teorías con las Tipo IIB y heterótica *SO*(32), respectivamente; la dualidad-S conecta esta última con las cuerdas Tipo I. En último término, las cinco teorías de cuerdas se hallan de una manera u otra conectadas con una teoría en 11 dimensiones. A esta misteriosa teoría se la denomina teoría M. El significado de la letra M es polivalente: M de mágica, madre, membrana y otros.

No se dispone de una formulación completa de qué sea la teoría M. Se sabe que es una teoría en 11 dimensiones que encierra en su formulación membranas, en vez de cuerdas. Las membranas son una generalización de la noción de cuerda donde el objeto que vibra no tiene una dimensión, como la cuerda, sino dos, como el parche de un tambor.

Otra propiedad fundamental de la teoría M es que, si se examina su contenido de partículas sin masa, se ve que es igual al de cierta teoría conocida desde finales de los años setenta, si bien desechada en su día por considerársela inviable para adquirir rango de teoría unificada. Nos referimos a la teoría de supergravedad en 11 dimensiones. La profundización reciente en la misma ha permitido



6. EXISTEN CINCO TIPOS DIFERENTES de teorías de supercuerdas definidas en 10 dimensiones: las cuerdas Tipo IIA, Tipo IIB, Tipo I, heterótica $E_8 \times E_8$ y heterótica *SO*(32). Si se desciende a nueve dimensiones compactando una dimensión, las dos cuerdas Tipo II son equivalentes (T-duales entre sí). También son T-duales entre sí las dos cuerdas heteróticas $E_8 \times E_8$ y *SO(32)*. Por otra parte, las cuerdas Tipo I y *SO*(32) son S-duales entre sí. Por fin, las cuerdas Tipo IIA y la heterótica $E_8 \times E_8$ se pueden obtener a partir de la teoría M, definida en 11 dimensiones. Pueden conseguirse, pues, todas las teorías a partir de una teoría M, única.



7. LA TEORÍA M es una teoría unificada de todas las supercuerdas y de la teoría de supergravedad en 11 dimensiones. En diferentes límites de esta única teoría (*denotados simbólicamente por picos en la figura*) se reobtienen esas seis teorías. La teoría M está aquí representada como un fragmento de superficie de forma irregular. En esa superficie cada punto indica diferentes geometrías de la teoría M.

reinterpretar su significado y relación con la teoría de cuerdas.

La teoría M designa la estructura que subyace a la teoría de cuerdas y sus extensiones. En razón de la geometría de las 10 dimensiones espaciales de la teoría, se reobtienen como caso particular las cinco teorías de supercuerdas existentes, así como la teoría de supergravedad en 11 dimensiones. Las simetrías de dualidad S y T dan relaciones entre diversas configuraciones de la teoría M. Es teoría única en muchos aspectos. Las conexiones entre sus subteorías presentan una autoconsistencia tal, que es difícil pensar en una teoría alternativa de estas características. Estamos quizás ante la candidata más firme jamás construida para describir las interacciones fundamentales de la naturaleza. Pero quedamos todavía muy lejos de entender toda su compleja estructura. El desentrañar los secretos que encierra la teoría M será, sin duda, uno de los objetivos de la física fundamental en los próximos años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

UNITY FROM DUALITY. P. Townsend en *Physics World*, página 41; septiembre 1995.

EXPLICACIÓN DEL TODO. Madhusree Mukerjee en *Investigación y Ciencia*, marzo 1996, páginas 70-77.

STRING DUALITY: A COLLOQUIUM. J. Polchinski en *Review of Modern Physics*, vol. 68, pág. 1245; 1996.

Desfibrilación y reanimación

Desde que la medicina comenzó a aplicar la electricidad para activar el corazón han transcurrido 50 años. Mucho se ha avanzado en el conocimiento de los desfibriladores; muy poco, en el de la fibrilación

Mickey S. Eisenberg

La operación transcurrió sin novedad. Hubo un breve período de taquicardia, cuando se administró el éter, pero se controló con digital. La intervención quirúrgica, de cierta dificultad técnica, duró dos horas. El tórax del chico de 14 años, con deformación congénita, permitía una respiración de sólo el 30 por ciento de lo normal. Claude S. Beck, cirujano jefe, separó las costillas a lo largo del esternón y reparó el fiasco de la naturaleza. Beck se relajó cuando empezó la parte fácil. Pero después de cerrar la herida, de 38 cm, sobrevino la crisis: el corazón del chico se paró. Beck agarró un escalpelo, cortó las suturas, rodeó el corazón con la mano y lo apretó rítmicamente. Notó el temblor inútil del corazón, a punto de entrar en fibrilación ventricular. En 1947 nadie sobrevivía a este trastorno del ritmo. Beck no se arredró.

Ordenó que se administraran adrenalina y digitálicos. Dueño de sí mismo, pidió un electrocardiógrafo y un desfibrilador, sin dejar de manipular el corazón. Se tardaron 35 minutos en obtener un electrocardiograma, que, en su vacilación y desorden, confirmaba la situación de fibrilación ventricular. Diez minutos después, sus ayudantes arrastraban un desfibrilador experimental desde el laboratorio de Beck, contiguo a la ciudad sanitaria de Cleveland. Instaló la máquina en el lugar adecuado y colocó sus dos planchas de metal directamente en el corazón del paciente. El equipo quirúrgico observó los espasmos cardíacos conforme los 1500 volt de electricidad atravesaban sus fibras musculares. Beck contuvo la respiración y esperó.

Con la descarga desfibriladora se busca dar una sacudida al corazón para conseguir una parada transitoria. Interrumpido el modelo caótico de contracciones, las células musculares cardíacas pueden reiniciar el trabajo siguiendo una secuencia ordenada. La primera descarga no funcionó. Beck volvió al masaje a corazón abierto mientras pedía más medicación. Transcurridos 25 minutos, ordenó una segunda descarga, que fulminó, ahora sí, las ondas fibrilatorias y se restableció un ritmo normal. Tres horas después el chico respondía a las preguntas. Acabaría por recuperarse del todo.

Beck comprendió la importancia del éxito de esta primera desfibrilación. En los años cuarenta Estados Unidos atravesaba una epidemia de coronariopatías (epidemia que no ha remitido y constituye todavía la causa principal de fallecimiento entre adultos). Beck sabía que la mayoría de las muertes coronarias, en especial por parada cardíaca súbita, las desencadenaba la fibrilación ventricular, ritmo fatídico del 65 por ciento de las paradas cardíacas. Un 3 por ciento de las paradas está causado por taquicardia ventricular (un ritmo cardíaco muy rápido), que suele desembocar en fibrilación, y el resto son consecuencia de un ritmo asistólico (línea recta) o de un ritmo denominado actividad sin pulso (un corazón fláccido incapaz de contraerse).

Apenas si sabemos algo sobre el detonante preciso de la fibrilación

MICKEY S. EISENBERG enseña epidemiología en la Universidad de Washington, de cuyo hospital clínico dirige el servicio de urgencias. Eisenberg lleva veinte años investigando la muerte súbita.



1. LA DESFIBRILACION sigue siendo la primera, última y principal esperanza para las víctimas de fibrilación ventricular. Las planchas, recubiertas con un gel conductor, envían una descarga a través del músculo cardíaco, gracias a la cual se reajusta su mecanismo regulador interno y torna a la normalidad.

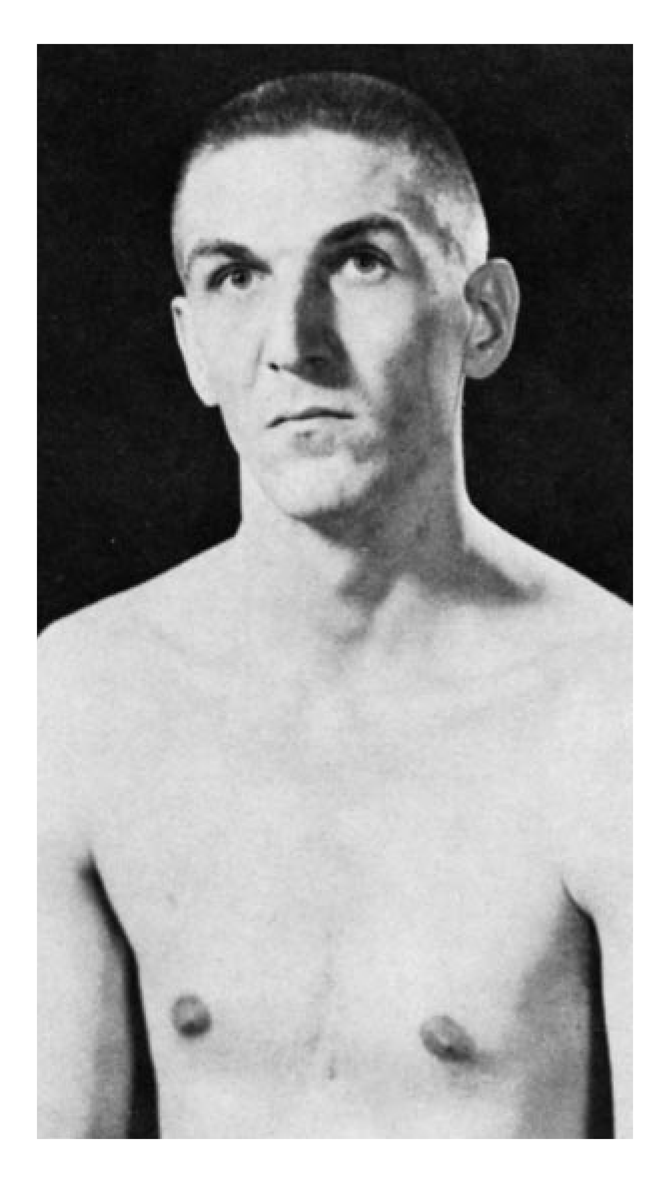
ventricular. En muchos casos, viene instada por la oclusión total o parcial de una arteria coronaria, que produce un área isquémica (e irritable) en el músculo cardíaco. A veces, sin embargo, el corazón entra en fibrilación ventricular sin una razón manifiesta. En el momento de la fibrilación, el corazón deja de bombear sangre, cesa el pulso y cae a cero la presión arterial. A esa muerte clínica le seguirá la muerte biológica irreversible si en escasos minutos no se restablece la circulación.

Aunque en ocasiones aparece durante una intervención quirúrgica, la fibrilación ventricular se produce casi siempre fuera del recinto hospitalario, durante cualquier actividad rutinaria. En 1947, la única opción de Beck era reabrir el tórax y apretar manualmente el corazón. La reanimación cardiopulmonar (RCP) no llegaría hasta 1960. Beck sabía que la compresión manual del corazón sólo ganaba tiempo: la electricidad era (y sigue siendo) el único medio de tratar la fibrilación ventricular. Nuestro cirujano había consagrado diez años a su máquina, desfibrilando centenares de perros. Le faltaba demostrar su potencial de salvar vidas en humanos. Un caso era todo lo que necesitaba. Publicó un artículo en el *Journal of the American Medical Association* e inmediatamente inició una campaña entre los médicos para que reconocieran la fibrilación y aprendieran cómo usar los desfibriladores.

Beck columbró que se estaba "en el umbral de un enorme potencial para salvar vidas". Vio en el desfibrilador la herramienta para tratar corazones en óptimas condiciones, que se librarían si la desfibrilación se producía con presteza. Cincuenta años después parece adecuado preguntarse por el camino recorrido. ¿Aprovechó el mundo su invención? ¿Se ha desarrollado su enorme potencial? ¿Qué depara el futuro?

El desfibrilador de Beck era una máquina grande y pesada, que operaba con corriente alterna y requería un transformador elevador pesado. El potencial, unos 1000 volt, se aplicaba durante un cuarto de segundo o medio segundo. No podía decirse que fuera una máquina portátil, aunque las ruedas le daban cierta movilidad. Su mayor inconveniente era la necesidad de colocar las planchas directamente en los ventrículos, porque no se sabía cuánta electricidad debía utilizarse para aplicar la descarga a través del tórax. Pero fue un comienzo. Desde aquellos modestos principios, los desfibriladores han ido disminuyendo de tamaño, han ganado en finura y han aumentado sus posibilidades. Con el avance de la técnica se han ido ensanchando las aplicaciones clínicas.

Tras el informe de Beck, en 1947, se colocaron desfibriladores en los





2. EL PRIMER PACIENTE al que se le provocó una desfibrilación (*a la izquierda 20 años después*) entró en fibrilación ventricular mientras era operado en 1947 para ensancharle el tórax con deformación de nacimiento. En aquella época, la fibrilación ventricular resultaba siempre mortal. Sin embargo, Claude S. Beck (*sobre estas líneas*), cirujano de la intervención, reanimó al paciente utilizando un desfibrilador similar al mostrado en la figura superior de la página siguiente.

quirófanos. Pero no habrían salido de la sala de operaciones y hubieran tenido un uso muy limitado mientras debiera abrirse el tórax y colocar las planchas directamente en el corazón. Así fue hasta que, en 1956, Paul M. Zoll, de Harvard, demostró la posibilidad de provocar la desfibrilación a través del tórax sin abrir. Los desfibriladores entraron en las salas de urgencia y en las unidades de cuidados coronarios.

Por su tamaño e inmovilidad, así como por operar con corriente alterna, los desfibriladores quedaron confinados a los hospitales. Habría que transformarlos en portátiles y acercarlos hasta donde viven los pacientes. Los obstáculos los superaron en 1960 Bernard Lown, de Harvard, y K. William Edmark, de la Universidad de Washington. Demostraron que los desfibriladores podían funcionar con corriente continua; más: los prototipos de corriente continua encerraban mayor seguridad porque, después de la descarga, se producían menos bloqueos cardíacos u otros trastornos del ritmo de difícil tratamiento. Además, la corriente continua permitía el funcionamiento del dispositivo con baterías portátiles y la utilización de condensadores. Aunque estos primeros prototipos alimentados por batería pesaban 16 kilos de largo, podía al menos contarse con ellos. Todo lo que se necesitaba era un medio para transportarlos hasta el paciente.

En el Hospital Reina Victoria de Belfast, dos cardiólogos observaron el elevado tributo en víctimas que se cobraban las coronariopatías (una carnicería casi invisible, porque se producía antes de que sus pacientes fueran ingresados, normalmente a la hora de aparición de los síntomas). J. Frank Pantridge y John S. Geddes razonaron que la única manera de llegar hasta los pacientes a punto de morir por una fibrilación ventricular era salirles al encuentro en su propio hogar. Remendando una ambulancia destartalada, establecieron la primera unidad móvil de cuidados intensivos en 1966. El equipo constaba de un médico y una enfermera con un desfibrilador que funcionaba alimentado por dos baterías de coche de 12 volt.

El éxito vino despacio, pero al cabo de 18 meses habían acumulado suficiente experiencia y publicaron los resultados en *Lancet*. Se referían a 10 pacientes con parada cardíaca. Todos habían sufrido fibrilación ventricular y todos fueron reanimados e ingresados en el hospital. Cinco habían sido ya dados de alta.

La idea corrió como la pólvora. A finales de los sesenta numerosas ciudades empezaron a contar con unidades móviles de cuidados intensivos. En EE.UU. los paramédicos,

dotación de formación específica, sustituyeron al dúo tradicional de médico y enfermera. Fenómeno hasta entonces desconocido, volvían a la vida personas con muerte súbita. Existen ya paramédicos que prestan cuidados de urgencia avanzados en países industriales.

Pero no basta con paramédicos y ambulancias. Cuando una persona entra en desfibrilación importa cada minuto; la espera de la ambulancia consume un tiempo precioso. Cuánto más útil no sería poner desfibriladores en manos de un grupo todavía mayor de profanos o de personal del servicio de urgencias.

Entrados los años setenta, los desfibriladores seguían operándose manualmente. El médico, enfermera o paramédico tenía que interpretar el ritmo cardíaco en un pequeño osciloscopio y, luego, si había fibrilación ventricular, aplicar las planchas y provocar la descarga. Para lograr que los desfibriladores estuvieran al alcance de un grupo mayor, habría que idear prototipos más manejables. Y se refinó la técnica. En los años ochenta, el desfibrilador recibió un "cerebro". En los modelos normalizados se introdujeron algoritmos informáticos con capacidad para detectar la fibrilación ventricular. Estos desfibriladores externos automáticos interpretan el ritmo del paciente y sólo liberan una descarga si hay fibrilación ventricular. Mediante la técnica de microcircuitos de voz, estos desfibriladores "inteligentes", con un peso de 1,8 kilos, "hablan" con el operador y le indican el procedimiento. Los desfibriladores inteligentes se hallan también al servicio del personal de urgencias, en hospitales móviles.

Cada nuevo adelanto técnico ha comportado un incremento del número de desfibriladores y multiplicado las circunstancias de empleo. Sólo en Estados Unidos, hay más de 250.000 desfibriladores. Unos 110.000 están desplegados fuera de edificios hospitalarios y quizá la mitad de ellos son desfibriladores externos automáticos.

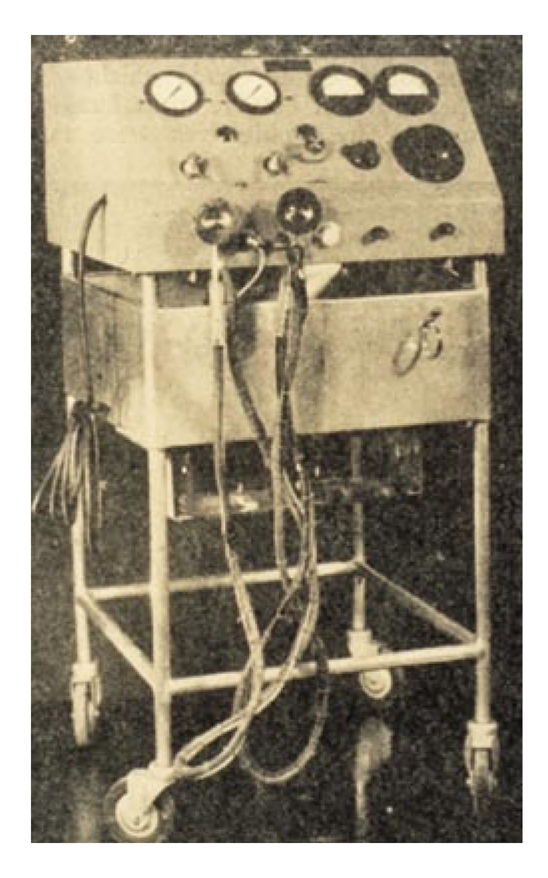
La Asociación Americana de Corazón lanzó una campaña de desfibrilación de acceso público en 1994. Defendía la posibilidad de poner desfibriladores externos automáticos en manos de quienes aportan primeros auxilios (incluidos policía y guardas de seguridad). Pese a todo, el rendimiento será limitado, pues la mayoría de las paradas cardíacas no suceden en los estadios ni en los centros comerciales, sino en el hogar o en la habitación.

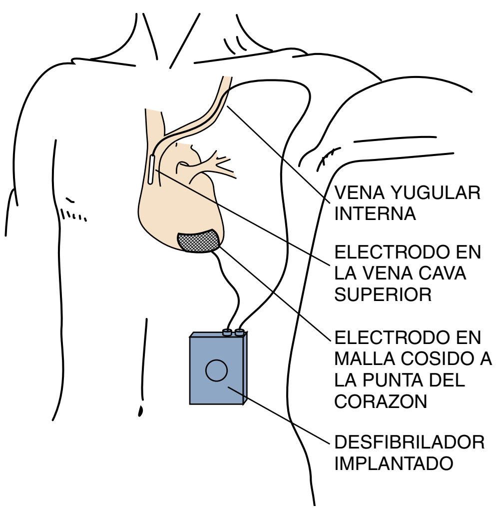
Parece verosímil que el éxito llegue cuando los desfibriladores se conviertan en productos de consumo expuestos en la farmacia del barrio. Los desfibriladores externos automáticos son todavía dispositivos de prescripción que cuestan en torno al medio millón de pesetas, aunque la producción en masa reduciría sensiblemente su precio. No se corre ningún riesgo por tener un desfibrilador automático en casa; el dispositivo emite una descarga sólo si se produce fibrilación ventricular. Algún día, los desfibriladores externos automáticos de consumo podrían ser tan habituales en los hogares como los extintores de fuego.

La idea de fabricar desfibriladores menores e inteligentes, y acercarlos del quirófano al hogar, puede llevarse más lejos. ¿Por qué no colocar un desfibrilador en el tórax del paciente? Es lo que hizo en 1966 Michel Mirowski, del Hospital Sinai de Baltimore, tras ser testigo de una trágica experiencia. Su mentor y amigo fue internado; padecía arritmias cardíacas recurrentes que no respondían a la medicación y precisaban monitorización constante y descargas de desfibrilación repetidas en la unidad de cuidados intensivos. Decidido a no pasarse la vida en el hospital, se firmó el alta, en contra de todos los consejos. Murió días después. Aunque no había solución por entonces, Mirowski se juró que la encontraría.

Trabajando en un laboratorio improvisado en el sótano del Sinai y sin fondos para investigar, Mirowski y Morton M. Mower se propusieron miniaturizar los desfibriladores para su implantación en pacientes de alto riesgo. Después de probar prototipos en perros, el primer ensayo en humanos se llevó a cabo en 1980, en el Hospital Johns Hopkins. Fue un éxito. Pasaron otros cinco años de ensayos clínicos antes de que el dispositivo lo aprobara la FDA, autoridad que entiende sobre distribución de fármacos y alimentos.

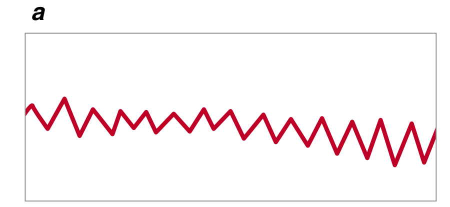
Los primeros desfibriladores implantables comercializables tenían el tamaño de una calculadora de bolsillo y pesaban unos 350 gramos. Con esas



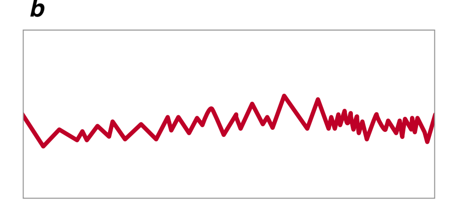


3. EL PRIMER DESFIBRILADOR que se utilizó en un ser humano tenía el aspecto del que se muestra aquí (*arriba*). Constaba de un transformador elevador, dispositivos de seguimiento y dos ingenios de succión en forma de copa que se colocaban directamente en el corazón. El desfibrilador medía unos 45 × 45 × 60 cm. Funcionaba con corriente alterna, conectado a un enchufe de pared. Los primeros desfibriladores implantables (*derecha*), muy voluminosos, pesaban unos 340 gramos; se implantaban en el abdomen y portaban electrodos que iban a la punta del corazón y la vena cava superior.

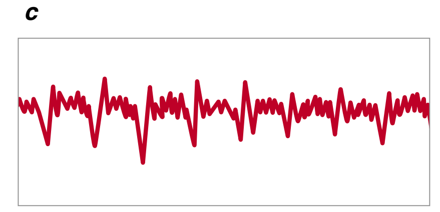
a



b



c



4. EL RITMO CARDIACO REAL de la primera persona que fue desfibrilada revela la cadencia vacilante y desorganizada de la fibrilación ventricular (*a* y *b*). En el último panel (*c*) se muestra el ritmo más normal consecutivo a la descarga desfibriladora.

magnitudes, tenían que colocarse en un pliegue cutáneo del abdomen con cables y electrodos que terminaban en el corazón. Había que intervenir a corazón abierto para implantarlos, pues los electrodos debían conectarse directamente al ventrículo. El dispositivo seguía sin cesar el ritmo cardíaco y, si detectaba fibrilación, cargaba sus condensadores y su batería liberaba una descarga de 34 joule. Bastaba esta energía mínima, comparada con los 200 o 300 joule de la desfibrilación externa estándar, porque se aplicaba directamente en el corazón y no tenía que atravesar el tórax.

La implantación de un desfibrilador constituía un intervención delicada, que sólo debía emprenderse en circunstancias extremas. Pero demostró que podían salvarse vidas. Desde 1985 se han venido sucediendo generaciones de desfibriladores cardioversores implantables. Cada generación se ha traducido en un dispositivo más refinado y reducido. La última versión, que pesa 85 gramos, puede implantarse, bajo la piel, en la parte superior del tórax. El titanio, carcasa del dispositivo, actúa de electrodo; el otro es un cable que se abre paso directo en el corazón a través de una gran vena. No se requiere ya cirugía a corazón abierto. En su colocación, un procedimiento ambulatorio sencillo, se tarda sólo una hora.

En los diseños más recientes, la batería tiene una vida de ocho años. Almacenan horas de información electrocardiográfica que se descargan a través de la piel y permiten al cardiólogo diagnosticar y hacer frente a los problemas que sobrevengan. No es todavía una técnica barata; sólo el desfibrilador cuesta los cinco millones de pesetas, a los que hay que sumar la mitad más por lo menos de gastos de implantación. En Estados Unidos, se han implantado hasta la fecha más de 100.000 dispositivos.

Claude Beck se asombraría ante los desfibriladores actuales. En 1947 no podían ni soñarse nuestros dispositivos inteligentes, de 85 gramos e implantados en los pacientes. ¿Se ha cumplido también la esperanza puesta en las posibilidades salvadoras de la desfibrilación? La respuesta es negativa. Pese a los centenares de programas de servicio médico de urgencia y los millares de paramédicos adiestrados en desfibrilación, por ceñirnos a Estados Unidos, sólo salva al año una ínfima proporción de las víctimas que sufren parada cardíaca: no pasan de escasos millares, pues la desfibrilación llega demasiado tarde.

Pero lo triste del caso es que no podemos predecir la fibrilación porque ignoramos su causa desencadenante. No podemos poner desfibriladores en las manos, o los tórax, de todos cuantos podrían beneficiarse de ellos. (El 20 por ciento de los casos de fibrilación ventricular se produce en personas sin historial previo de cardiopatía.) Según parece, entre los agentes hemos de mencionar la isquemia (riego sanguíneo insuficiente en parte del músculo cardíaco, lo que le vuelve irritable), las anomalías electrolíticas, los desequilibrios del sistema autónomo, causados por oleadas anómalas de hormonas como la adrenalina, los fármacos y trastornos hereditarios.

No andamos más sobrados de conocimientos respecto a la desfibrilación. Se acepta que la descarga eléctrica despolariza simultáneamente toda las fibras musculares cardíacas, confiriendo a su mecanismo regulador interno la posibilidad de reajustarse y retornar a la normalidad. Depare el futuro una disponibilidad general de desfibriladores externos automáticos o se extiendan los dispositivos implantables, conviene no olvidar que la única solución definitiva al problema de la fibrilación ventricular estriba en la prevención.

Por ahora, la desfibrilación rápida ofrece la única esperanza para las víctimas de muerte cardíaca súbita. Los desfibriladores reflejan el avance de la técnica médica y prometen una vida más larga. Pero en esa prolongación se esconde una paradoja, descubierta por Lewis Thomas: lo que consideramos técnica de punta (en este caso, la desfibrilación) no deja de ser técnica rupestre, pues son rudimentarios nuestros conocimientos de la enfermedad.

La cota superior de la técnica médica se mueve en costes baratos y deriva de una buena comprensión de la enfermedad (la vacunación, por ejemplo). La cota inferior, muy cara, se halla más atenta a remediar los estragos de la enfermedad que a su prevención. Podemos crear desfibriladores en miniatura e implantarlos en el tórax, pero seguimos sin saber por qué el corazón empieza de repente a fibrilar. Y, por nuestra ignorancia, no podemos anticipar los signos delatores.

Cincuenta años de sorprendentes progresos clínicos y técnicos en este campo no han logrado apear del primer lugar a la fibrilación ventricular entre las razones de defunción en adultos. Cabría decir que la visión de Beck se ha cumplido en un 50 por ciento.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VENTRICULAR FIBRILATION OF LONG DURATION ABOLISHED BY ELECTRIC SHOCK. C. S. Beck, W. H. Pritchard y H. S. Feil en *Journal of the American Medical Association*, volumen 135, páginas 985-986; 1947.

A MOBILE INTENSIVE-CARE UNIT IN THE MANAGEMENT OF MYOCARDIAL INFARCTION. J. F. Pantridge y J. S. Geddes en *Lancet*, n.º 7510, páginas 271-273; 5 de agosto, 1967.

MUERTE SÚBITA POR PARO CARDÍACO. M. S. Eisenberg, L. Bergner, A. P. Hallstrom y R. O. Cummins en *Investigación y Ciencia*, volumen 254, n.º 5, páginas 37-43; julio 1986.

DEFIBRILLATION OF THE HEART. W. A. Tacker y cols. Mosby, 1994.

Cuando no se tiene un desfibrilador a mano

Carl E. Bartecchi

La reanimación cardiopulmonar, RCP, puede salvar a las víctimas de fibrilación ventricular y de su predecesor común, la taquicardia ventricular. Pero con esa técnica sólo se recupera un porcentaje mínimo de los pacientes con parada cardíaca acaecida fuera del hospital. Las razones son preocupantes. No hay que esperar que las personas mayores, las más necesitadas de RCP, estén preparados para la misma. Ni cabe confiar en que los presentes circunstanciales ayuden, preocupados por su propia salud en esta era del sida, la hepatitis y la tuberculosis fármacorresistente. Pese a que las paradas cardíacas tienden a ocurrir en casa, los familiares de los pacientes siguen ignorando las técnicas de RCP. Por otro lado, la atmósfera de enorme tensión que rodea las paradas cardíacas no es la más propicia para aplicar el proceso claro y metódico aprendido en los cursos de RCP.

Hay otra técnica más sencilla y fácil de aprender. Son unas maniobras que se aplican en seguida: durante los cuatro a seis minutos que disponemos para restablecer la circulación y la oxigenación. Tampoco aquí cabe esperar un éxito clamoroso. La propia naturaleza de la parada cardíaca, junto con la edad y los problemas subyacentes, luchan en contra la recuperación de la víctima. Sin embargo, el mero hecho de hacer *algo* puede salvar una vida a veces. Unos masajes torácicos podrían mantener con vida a una persona durante unos minutos hasta que llegue el médico. Siempre hay que hacer algo y hacerlo rápido.

Qué hacer

Cuando alguien sufre un desvanecimiento, hay que tomarle el pulso o el latido cardíaco. Si lo notamos, hemos de levantar sus piernas 60 cm por encima del plano del cuerpo tumbado (para aumentar el retorno de líquido a la circulación central). Solicitar ayuda médica.

Si no hay pulso, sospechar inmediatamente de una parada cardíaca. Comprobar si las vías respiratorias están obstruidas y despejarlas. Dado que la mayoría de las víctimas reanimadas de una parada cardíaca tienen taquicardia ventricular o fibrilación ventricular, suponer que éste es el problema y seguir uno de estos dos procedimientos:

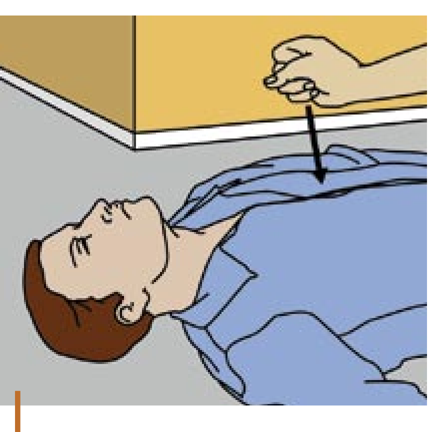


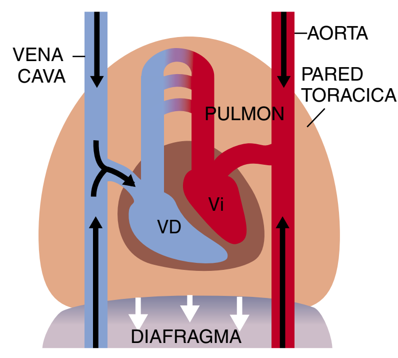


Toser

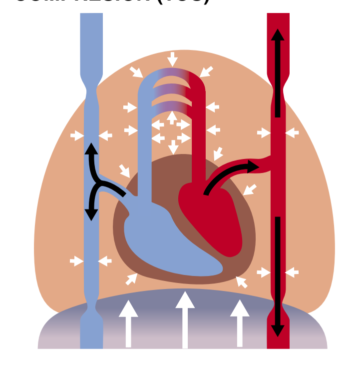
Si la víctima está consciente y puede, debe alentársela a que tosa con fuerza una o dos veces. Se ha demostrado que la expectoración enérgica transmite una pequeña cantidad de corriente al corazón, capaz de terminar con las cadencias desacompasadas catastróficas y restablecer un ritmo cardiaco eficaz. Se trata de una medida de autoadministración; el paciente con cardiopatía conocida que siente palpitaciones súbitas en el tórax seguidas de mareo y el sentimiento de inminente pérdida de la consciencia no perderá nada si se esfuerza en toser una o dos veces.







COMPRESION (TOS)



Durante la fase inspiratoria de la tos, el movimiento descendente del diafragma facilita el retorno sanguíneo hacia el ventrículo derecho del corazón e incluso oxigena la sangre que fluye a través de los pulmones. Durante la fase espiratoria, la contracción de los músculos abdominales fuerza el diafragma a la cavidad torácica, generando elevadas presiones que se aplican al corazón y los vasos sanguíneos asociados con él, que, a su vez, impulsan la sangre hacia el cerebro y otros órganos a través de las válvulas cardíacas abiertas.

La tos vigorosa, regular y repetida (a un ritmo de hasta 60 por minuto) puede impulsar, con igual eficacia que la RCP clásica, el flujo sanguíneo hacia órganos cruciales, abasteciendo así al corazón enfermo. Se ha demostrado que esta RCP a través de la tos es eficaz durante 90 segundos, aunque se han publicado casos aislados de hasta cinco minutos. El único problema es que el paciente se cansará.

Dar un puñetazo

Si el paciente se siente incapaz de expectorar, dénsele uno o dos golpes de puño en la mitad del tórax antes de que transcurra un minuto después del colapso. El puñetazo debe aplicarse a una distancia de 15 a 20 cm por encima del tórax, en un área situada a unos dos tercios de la distancia hacia abajo del esternón. Si el primer puñetazo no produce pulso, debe darse inmediatamente un segundo, más fuerte. El puñetazo puede pegárselo uno mismo también.

No se sabe cómo funciona la técnica del puñetazo, pero se sospecha que produce un estímulo electromecánico que interrumpe el trastorno indeseable del ritmo.

CARL E. BARTECCHI es profesor de medicina clínica en la Universidad de Colorado.

Así funciona el supertransistor

El transistor bipolar de puerta aislada está transformando la electrónica de potencia

B. Jayant Baliga



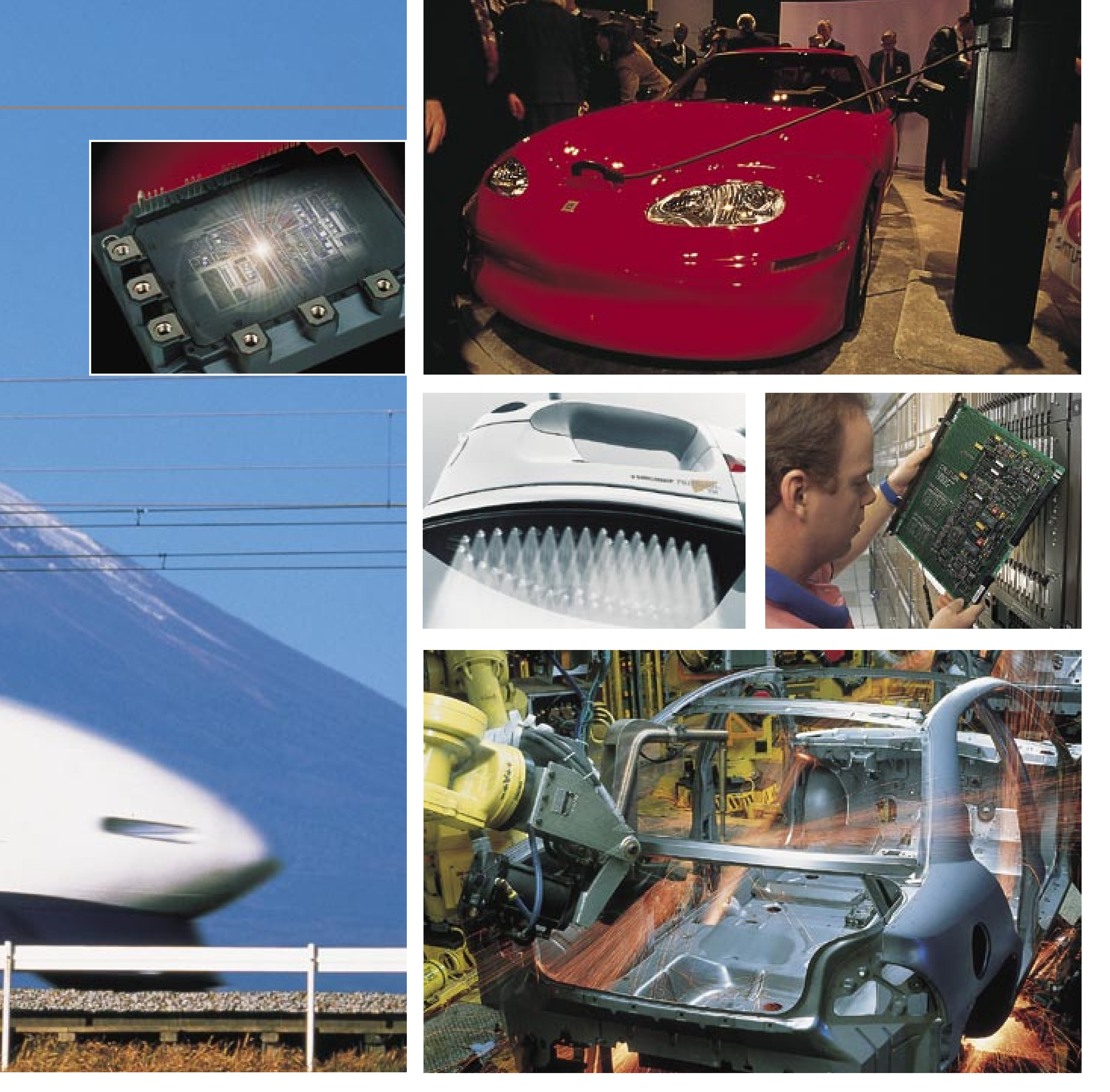
Aunque raras veces se reconozca, la invención del transistor en los laboratorios de Bell Telephone en los años cincuenta provocó una doble revolución en la electrónica. Una, la más popular, se manifiesta en la progresiva miniaturización. Su impulso fundamental vino al final de esa década, cuando Robert N. Noyce y Jack Kilby por separado crearon el circuito integrado, que incorporaba múltiples transistores en una sola pastilla constituida por capas de material semiconductor. Transcurridos los años, se integrarían en finas láminas de silicio, no mayores que una uña, millones de transistores, cada uno de los cuales mide sólo algunos micrometros y consume del orden de una millonésima de watt por operación.

La otra revolución, menos conocida, se caracteriza por la tendencia opuesta: transistores de magnitud creciente, capaces de manejar mayores potencias eléctricas. En el oscuro mundo de los semiconductores gigantes la innovación fundamental llegó hace sólo unos años, y ahora es cuando comienza a imponerse.

El desarrollo clave de la electrónica de potencia fue la invención de un nuevo tipo de transistor, llamado IGBT (siglas en inglés de transistor bipolar de puerta aislada). Se trata de dispositivos semiconductores del tamaño de un sello de correos, capaces de agruparse para conmutar corrientes eléctricas de hasta 1000 ampère a tensiones de varios miles de volt. Y es de máxima importancia que los IGBT puedan conmutar esas corrientes a velocidades extremadamente rápidas, por lo que aventajan a sus predecesores en todos los terrenos.

Los IGBT se utilizan ya como conmutadores que controlan potencia en muy diversos tipos de aparatos, componentes y sistemas. En muchos casos, se interconectan IGBT para controlar la potencia aplicada a motores eléctricos.

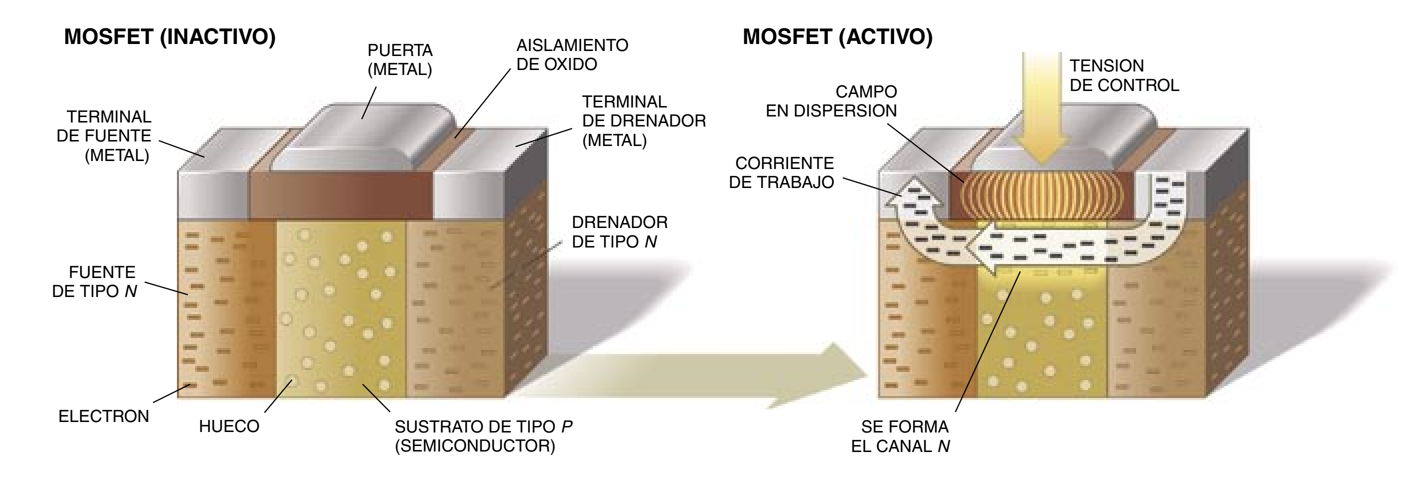
El control de los motores eléctricos reviste enorme importancia. Es

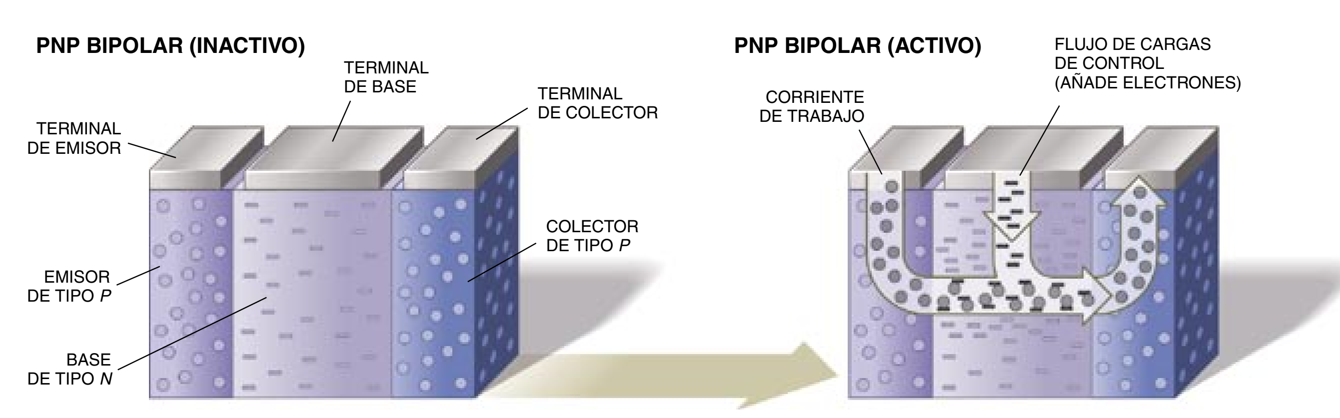


1. LAS APLICACIONES del transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) abarcan de las planchas de vapor a las centrales automáticas telefónicas, pasando por coches eléctricos y trenes de alta velocidad. Los IGBT son especialmente apreciados en la automatización de fábricas porque la precisión de movimientos de los brazos robóticos requiere un control de motores muy fino. El dispositivo en sí consiste en una lámina de silicio encapsulada en plástico (*arriba a la izquierda*). Impresionan las prestaciones del transistor bipolar de puerta aislada: puede conmutar hasta 1000 ampère.

sabido que las fábricas dependen en gran medida de máquinas, equipos o robots accionados por motores. Puede estimarse que una familia media de un país desarrollado utiliza más de 40 motores eléctricos, contando todo tipo de máquinas del hogar, herramientas eléctricas, acondicionadores de aire y utensilios de aseo. Los motores de trenes y tranvías eléctricos necesitan también controles, y como ejemplo los motores de los últimos trenes de alta velocidad llevan hoy control por IGBT. Los coches eléctricos construidos en estos últimos años dependen también en alto grado de los IGBT.

Para variar la velocidad y la potencia de la mayoría de los motores de corriente alterna modernos, sean de una batidora o de un tren AVE, se altera la frecuencia y la amplitud de la onda senoidal aplicada a los arrollamientos del motor. Con este tipo de sistema de control, denominado mando de velocidad ajustable, el rotor del motor gira a la misma frecuencia de la onda senoidal. Esta onda puede crearse mediante grupos de IGBT que emiten impulsos de duración y amplitud controladas con precisión. Como los IGBT pasan con suma rapidez de conducción (*on*) a no conducción (*off*), se puede obtener una onda senoidal suavizada, lo que a su vez evita que el motor genere





2. COMBINACION DE LOS TRANSISTORES MOSFET y bipolar para crear el IGBT, robusto dispositivo de alta potencia. En el transistor de efecto de campo de metal óxido semiconductor (MOSFET), la aplicación de tensión a una puerta metálica hace que circule corriente. Se crea entonces un campo eléctrico que repele, alejando de la puerta, a los huecos (ausencias de electrones) de carga positiva. Al mismo tiempo atrae a los electrones que forman un canal *n* entre la fuente y el drenador por el que pasa corriente. En el transistor bipolar *p-n-p* la corriente de control es pequeña y añade electrones a la base, atrayendo huecos del emisor. Tales huecos van del emisor al

excesivos armónicos (ondas parásitas cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia básica). Los armónicos crean calor, desperdician energía y perjudican al motor u otros equipos del circuito.

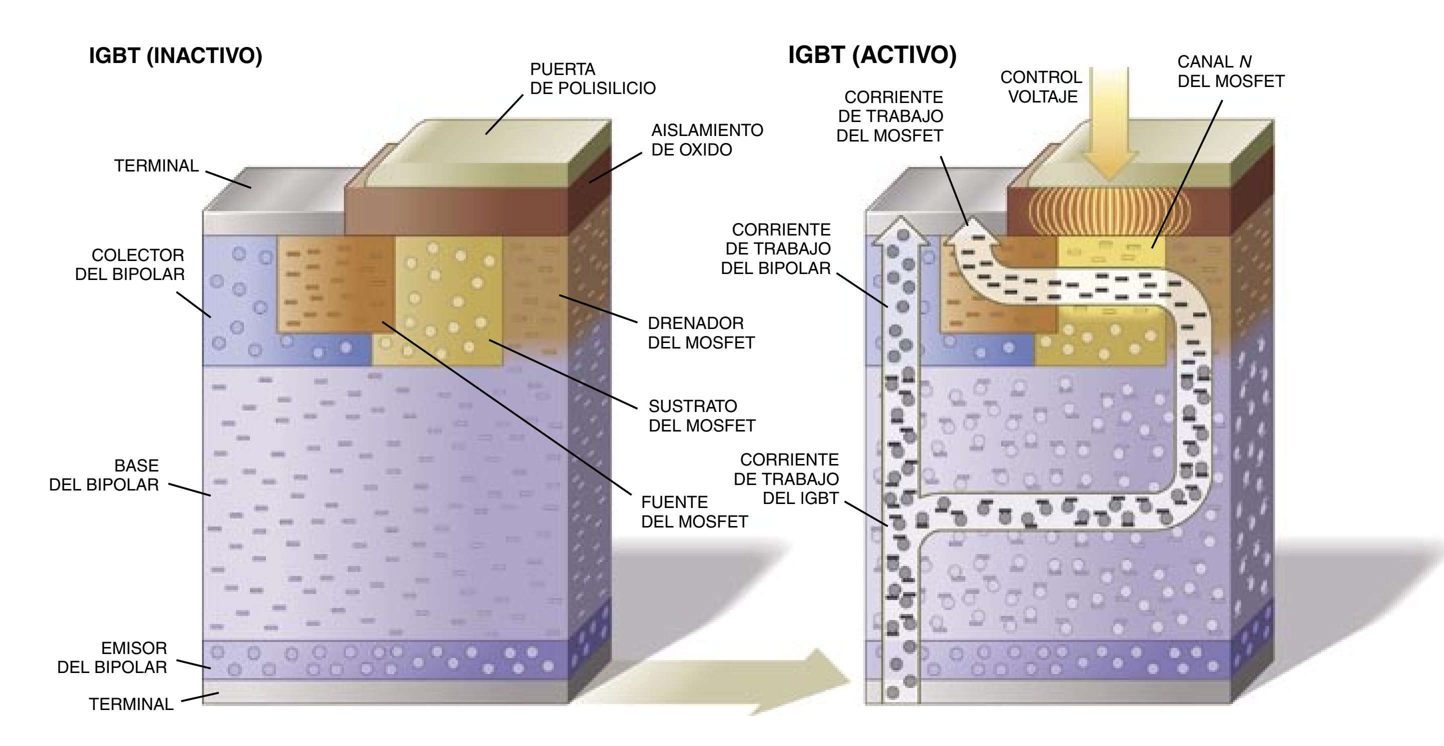
Antes de los IGBT, los motores utilizados en calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire (HVAC, de las siglas en inglés) solían funcionar a velocidad constante. Se limitaban a arrancar y parar a diferentes intervalos para acomodarse a los cambios de la temperatura ambiente. El rendimiento con cargas descompensadas era bajo. Los controles de velocidad ajustable basados en IGBT ofrecen un rendimiento muy superior, que se traduce en un ahorro estimado de millones de barriles de petróleo al día, reduciendo así también la contaminación. Estos eficaces controles de HVAC han sido ya adoptados en el Japón y son cada vez más apreciados en Europa y los Estados Unidos.

Otra ventaja de los IGBT deriva de su velocidad de conmutación: son tan rápidos, que la frecuencia de los impulsos que generan supera con facilidad el margen de la audición humana. Por eso se utilizan para conseguir compresores silenciosos de acondicionadores o refrigeradores. El zumbido que suelen emitir los compresores lo producen dispositivos de electrónica de potencia no tan rápidos, que sólo pueden activarse y desactivarse a frecuencias comprendidas en la gama audible.

Por supuesto, los IGBT sirven para mucho más que para controlar motores. Ciertas firmas los están utilizando para activar y desactivar los píxeles (elementos de imagen) en las pantallas de sus ordenadores portátiles más modernos. Se incorporan asimismo en las centrales de conmutación telefónica para encaminar las señales mediante la conexión de distintos circuitos, y también para activar el circuito emisor de la corriente de llamada que hace sonar el teléfono. Incluso hay una compañía que emplea los IGBT para fabricar un desfibrilador avanzado, aparato que emite una descarga eléctrica capaz de reanimar a la víctima de un paro cardíaco. También contienen IGBT las reactancias de las lámparas fluorescentes y de arco con el fin de regular la potencia que generan estos tubos cuando descargan a través de la resistencia eléctrica del gas y emiten radiación electromagnética.

Contando con todo, los dispositivos de electrónica de potencia, incluidos los IGBT, controlan del 50 al 60 por ciento de toda la potencia eléctrica generada en los países industriales. Porcentaje que además crece, debido en gran parte al éxito de los IGBT.

El pujante dominio de estos dispositivos en los principales equipos de la electrónica de potencia señala la conjunción de las dos revoluciones electrónicas que se iniciaron hace medio siglo. Con una corriente eléctrica de unas milésimas de ampère



colector, creando una corriente de trabajo grande. En el IGBT se aplica una tensión de control al MOSFET, generando una corriente de trabajo que a su vez se aplica como corriente de control a la base de un *p-n-p* bipolar. Esta ingeniosa configuración que combina las corrientes de trabajo del MOSFET y el bipolar consigue una ganancia de potencia —relación entre la tensión y corriente de trabajo y la tensión y corriente de control— cercana a los 10 millones. Tal ganancia permite conectar los IGBT a circuitos microelectrónicos.

los IGBT pueden controlar corrientes, por ejemplo, de 100 ampère a 1500 volt. Y, gracias a esta capacidad de ser controlados por corrientes ínfimas, los IGBT comparten la misma pastilla con los circuitos que permiten su control por microprocesadores. Buscando analogías fisiológicas, el microprocesador y sus pastillas de memoria asociadas se comportan como el cerebro, y los IGBT como los músculos.

Se comprenderá mejor el creciente influjo de los IGBT si se examina el campo de los semiconductores de potencia. El mercado podría dividirse en tres categorías según la tensión: baja, media y alta. La primera, con aplicaciones por debajo de unos 100 volt, incluye sistemas eléctricos de automoción, ciertos circuitos de alimentación para ordenadores personales y amplificadores de audio como los que se utilizan en sistemas estereofónicos de alta fidelidad. Este segmento de mercado está dominado por un tipo de dispositivo denominado MOSFET (siglas en inglés de transistor de efecto de campo de metal óxido semiconductor), que hoy viene a ser una variedad corriente de transistor.

La gama media de tensiones es amplia, desde los 200 hasta los 1500 volt aproximadamente, y es el terreno propio de los IGBT. Puede, a su vez, subdividirse en otras dos categorías. En la parte inferior están las pantallas de ordenadores portátiles, los conmutadores de telecomunicaciones y las reactancias de alumbrado, que suelen todos necesitar dispositivos capaces de controlar entre 200 y 500 volt. Las intensidades de corriente son pequeñas (menos de 10 ampère), por lo que se tiende a realizar en la misma pastilla los dispositivos de conmutación de potencia y la microelectrónica que los controla.

En la parte superior de esta categoría media se sitúan aplicaciones típicas de control de motores y robótica, donde se exigen tensiones de 500 a 1500 volt. Los IGBT son especialmente atractivos para la robótica, porque los movimientos precisos de plataformas y brazos sólo pueden lograrse con controles de superior calidad en los motores.

En la categoría de altas tensiones se encuentran aplicaciones para propulsión de locomotoras y distribución y transmisión de energía eléctrica, incluyendo la conversión entre corriente alterna y corriente continua. Las tensiones nominales pueden superar los 5000 volt y los dispositivos han de manejar corrientes de 1000 ampère. Para controlar tensiones y corrientes tan elevadas suele utilizarse un dispositivo semiconductor llamado tiristor. Pero los IGBT han empezado a ocupar el extremo inferior de esta categoría, a raíz de la introducción por varias compañías japonesas de unos dispositivos capaces de funcionar a 3500 volt y 1000 ampère. Estos IGBT de alta potencia controlan ahora, por ejemplo, los motores de los trenes bala japoneses.

Los IGBT son un excelente ejemplo de que el todo puede superar la suma de las partes. Cada IGBT se compone de dos transistores: un MOSFET y otro de tipo bipolar. Los transistores bipolares son los más sencillos y ro-

B. JAYANT BALIGA dirige el centro de investigación de semiconductores de potencia de la Universidad estatal de Carolina del Norte, por él fundado en 1991. De 1979 a 1988 gestionó el desarrollo de dispositivos de potencia en la laboratorio de General Electric en Schenectady, estado de Nueva York. Desde 1988 enseña ingeniería eléctrica en la estatal de Carolina del Norte.

bustos, y descienden directamente de los trabajos iniciados en los Laboratorios Bell a finales de los cuarenta. Por su diseño pueden acomodarse a niveles de potencia elevados y admiten velocidades de conmutación extremadamente altas. Requieren, sin embargo, una intensidad de corriente apreciable para controlar una corriente aún mayor; en otras palabras, su ganancia de potencia es modesta. Los MOSFET, por contra, no admiten altos niveles de potencia, pero su ganancia es fabulosa. Merced a un acertado diseño, los IGBT combinan las mejores características de ambos dispositivos.

Para comprender cómo consiguen los IGBT esta carambola se requieren ciertos fundamentos sobre el transistor y la operación de las variedades bipolar y MOSFET.



3. EL DESFIBRILADOR avanzado basado en IGBT genera un impulso que reanima el corazón a través de almohadillas aplicadas al pecho.

Los transistores pueden diseñarse para funcionar como conmutadores, que bloquean o permiten la circulación de corriente eléctrica, o como amplificadores, que convierten pequeñas corrientes en otras mucho mayores. En la electrónica de potencia, donde preocupa sobre todo la conmutación, los transistores se distinguen por el valor de la potencia que controlan.

La electricidad puede compararse al líquido que fluye por un tubo. Así como la potencia hidráulica es el producto de la presión por el caudal volumétrico, la potencia eléctrica es el producto de la tensión por la intensidad de corriente. De este modo, la potencia que puede controlar un transistor viene dada por su máxima tensión de funcionamiento y la máxima corriente que admite. En su estado de conducción (*on*), el transistor deja pasar corriente y la entrega a la carga, ya sea ésta un calentador, el devanado de un motor o cualquier otro sistema. Cuando no conduce (estado *off*), el transistor soporta una alta tensión sin dejar pasar la corriente.

Los transistores constan de tres terminales eléctricos. La corriente de "trabajo", grande, entregada a la carga circula entre terminales conectados a las regiones del transistor conocidas como emisor y colector; en el MOSFET, estas regiones se llaman fuente y drenador. La corriente de "control", menor, que deja pasar la corriente de "trabajo" o la corta, circula entre la tercera región (base, o puerta en el MOSFET) y el emisor (o la fuente).

El emisor, la base y el colector son elementos del transistor. Todos ellos suelen ser de silicio, impregnado o "dopado" con impurezas para conferirle las propiedades eléctricas deseadas. Si el dopado produce un exceso de electrones móviles, el material será de tipo *n*; cuando el dopado genera ausencias de electrones (denominados huecos), el material será de tipo *p*. Se crea un transistor bipolar yuxtaponiendo tres capas de estos tipos de semiconductor en el orden *n-p-n* o, alternativamente, en el orden *p-n-p*. Si el emisor es de tipo *n*, la base será de tipo *p*, y el colector de tipo *n*.

En el transistor bipolar *n-p-n*, la corriente de trabajo va del emisor al colector a través de la base, pero sólo cuando está pasando la corriente de control. Cuando circula esta corriente, añade huecos a la base, con lo que atrae electrones del emisor. Al cesar la corriente de control, ya no se añaden huecos a la base; la corriente de trabajo deja de circular. El funcionamiento de un transistor *p-n-p* es esencialmente idéntico al del *n-p-n*, más común, pero con una diferencia importante: en el *p-n-p* se han invertido los papeles de los electrones y huecos con respecto al *n-p-n*.

La capacidad de impedir el paso de corriente, aunque se aplique una alta tensión entre los terminales de emisor y colector de un transistor, satisface una de las exigencias esenciales de la electrónica de potencia. Esto se consigue variando el tamaño y las concentraciones de dopado de las regiones del transistor, en particular del colector.

Para comprender lo anterior conviene examinar cómo bloquea la corriente el transistor. El bloqueo se realiza cerca de la interfaz, o unión, donde un material de tipo *p* se encuentra con un material de tipo *n*: por ejemplo, en la unión entre la base y el colector. Supongamos que se conecta una tensión relativamente positiva al material *n*, y una tensión relativamente negativa al material *p*. La unión queda entonces polarizada a la inversa y puede impedir el paso de corriente. Ocurre que la polarización inversa crea a uno y otro lado de la unión las regiones de empobrecimiento, en las que una falta de electrones (huecos) imposibilita la circulación de corriente.

Hay un campo eléctrico en el colector que actúa contra esta región de empobrecimiento que bloquea el paso de corriente. Dicho campo favorece el paso de corriente porque bajo su influjo los electrones atraviesan el colector. Al aumentar la tensión, crece la intensidad del campo hasta que termina por vencerse la resistencia que ofrece la región de empobrecimiento y circula corriente por la unión. Importa, pues, reducir al mínimo ese campo, para lo cual se hace un colector bastante grueso y muy poco dopado. Con estas técnicas se han conseguido uniones que resisten la aplicación de miles de volt.

En contraste con el colector grueso y de ligero dopado, la base del transistor bipolar es delgada y su dopado, intenso. Estas características favorecen la difusión de electrones a través de la base, necesaria para asegurar una buena capacidad de transporte de corriente cuando el transistor se encuentra en estado de conducción. La capacidad de conducir grandes corrientes se requiere también para conseguir una ganancia de potencia elevada, definida como la relación entre la potencia sujeta a control en el circuito colector-emisor y la potencia de entrada en el circuito base-emisor. La potencia controlada (en el circuito colector-emisor) es el producto de la corriente que transporta el dispositivo en estado de conducción por la tensión en el terminal colector cuando el dispositivo no conduce.

En un transistor bipolar, la corriente de base puede controlar una intensidad de corriente diez veces mayor en el colector. En el caso típico la tensión del colector no llega a ser 100 veces la de la base, de modo que se trabaja con ganancias de potencia inferiores a 1000. En razón de tan modesta ganancia, para los niveles

cercanos a un kilowatt de la mayoría de las aplicaciones, el circuito de control ha de admitir varios watt. Este nivel de potencia exige, a su vez, un circuito de control complejo y robusto. Además, para que opere con plena seguridad, los transistores bipolares deben utilizarse con otros componentes protectores.

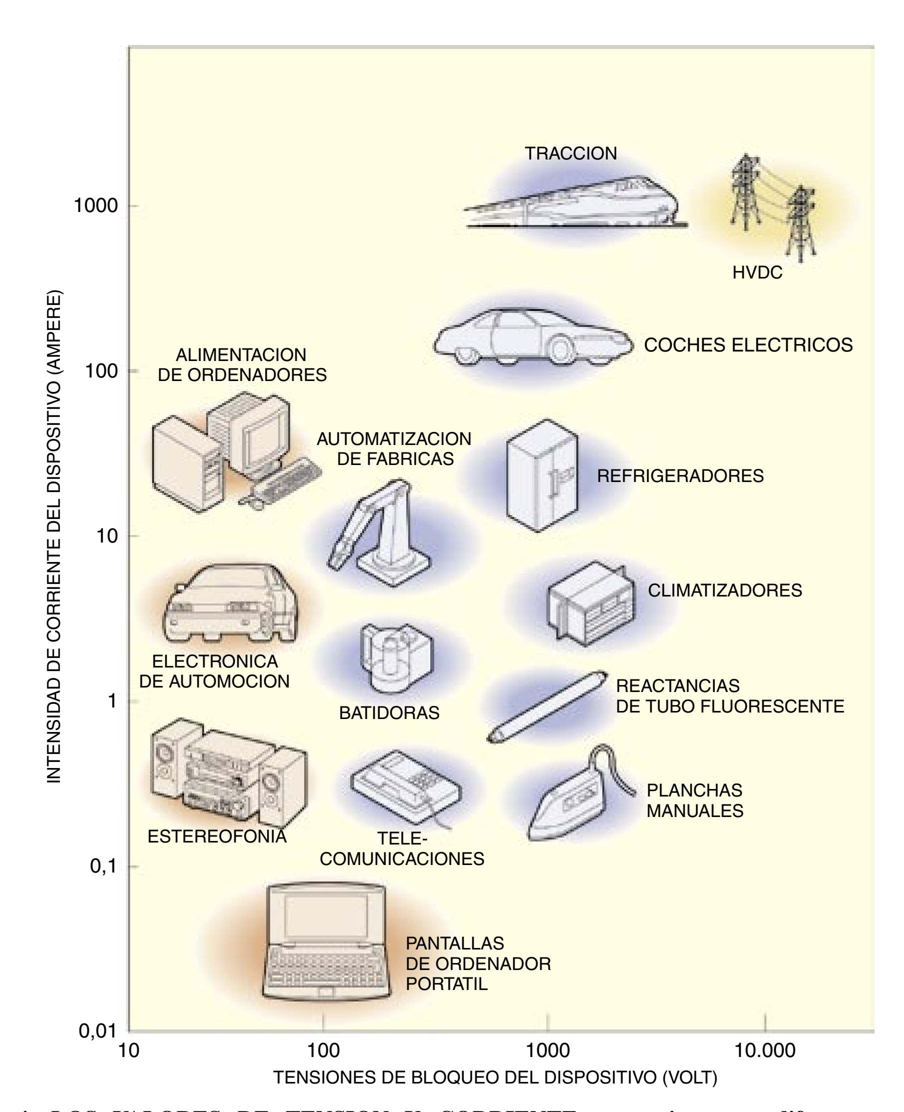
El éxito logrado por los mejores dispositivos MOSFET e IGBT tiende cada vez más a colocar los transistores bipolares en los nichos de mercado. En las aplicaciones de alta tensión todavía dominan los tiristores, que comprenden dos transistores bipolares. Existen tiristores capaces de aguantar 6000 volt en el estado de no conducción y de conducir 1000 ampère cuando pasan al otro estado. Es decir que un solo dispositivo semiconductor —una oblea de 10 centímetros de diámetro— ¡llega a controlar seis megawatt de potencia! Por desgracia, proporcionan una ganancia de corriente menor de cinco y requieren una enorme corriente de control, suministrada por circuitos complejos, voluminosos y pesados de utilización incómoda, por ejemplo, en vehículos. Además, la máxima velocidad de conmutación de estos tiristores es tan baja, que la frecuencia de operación del sistema cae dentro del margen de percepción audible, con la consiguiente contaminación acústica producida por vibraciones en los devanados del motor.

El otro componente del IGBT, el MOSFET, funciona sobre un principio que difiere bastante del transistor bipolar. Un MOSFET *n-p-n* (MOSFET de canal *n*) comprende dos regiones de tipo *n* —la fuente y el drenador— que son análogas al emisor y colector de un transistor bipolar. Entre fuente y drenador se encuentra una región de tipo *p*, o sustrato.

Encima del sustrato, que es de un material de silicio semiconductor, se extiende una capa no conductora de dióxido de silicio; sobre ésta se apoya una “puerta” de metal. (De ahí las primeras tres letras del acrónimo inglés, *metal oxide semiconductor*.) Normalmente no fluyen cargas desde la fuente al drenador, a través del sustrato situado debajo mismo de la capa de óxido. Sin embargo, cuando se aplica una tensión positiva a la puerta metálica, se crea un campo eléctrico que penetra en la capa de óxido y llega al sustrato. (Esto explica las tres últimas letras del acrónimo, *field-effect transistor.*) El campo generado repele los huecos de carga positiva (ausencias de electrones) del sustrato y los aleja de la puerta. Al mismo tiempo atrae los electrones hacia la superficie del sustrato, debajo mismo de la capa de óxido. Estos electrones móviles forman entonces una corriente que circula a través del sustrato, inmediatamente bajo el óxido, entre el drenador y la fuente.

El aspecto más importante del funcionamiento de un MOSFET es que se activa y desactiva por tensión, no por corriente. El paso de corriente por la puerta se limita a cortos impulsos del orden de miliampère que sólo se producen cuando el transistor se activa y se desactiva. (El origen de estos impulsos es que el sustrato semiconductor y la puerta metálica, separados por la capa de óxido, forman un condensador que genera corrientes transitorias al cargarse y descargarse.)

Los MOSFET son herederos de la técnica del metal óxido semiconductor complementario (CMOS), desarrollada en los primeros años setenta. De hecho, CMOS se ha convertido en piedra angular de todos los circuitos integrados de silicio que existen en el mercado. Aunque en aquella época los fabricantes de transistores de potencia confiaban en la técnica bipolar, pronto se comprendió que podría aumentarse la ganancia de los transistores aprovechando la estructura de la puerta MOS.



4. LOS VALORES DE TENSION Y CORRIENTE necesarios para diferentes aplicaciones del transistor muestran grandes variaciones. En las tensiones más bajas (*en rosa*) todavía se utilizan sobre todo MOSFET. En el otro extremo, con máxima capacidad de bloquear tensión y conducir corriente, están los tiristores empleados en los sistemas de transmisión eléctrica de corriente continua y alta tensión (HVDC). La gran masa de aplicaciones intermedias (*en azul*) pertenece cada vez más a los IGBT.



5. ESTE PLATO CENTRIFUGADOR contiene ocho obleas de silicio, cada una de ellas capaz de dar unos 320 IGBT. Dentro de una cámara de vacío, se depositan metales preciosos sobre el dorso de las obleas para producir los componentes conductores de cada dispositivo. La fotografía se ha tomado en la fábrica de transistores de potencia MOS 4 de Motorola en Phoenix, Arizona.

Esta idea condujo en los años setenta al desarrollo de los MOSFET de potencia por International Rectifier Corporation en El Segundo, California. Además de conseguir una superior ganancia de potencia, los dispositivos conmutaban con más rapidez y no necesitan los embarazosos circuitos de protección de los transistores bipolares. Aunque excelentes en muchos aspectos, los MOSFET de potencia presentan un grave inconveniente: su capacidad de conducir corriente se degrada rápidamente cuando se les exige trabajar a más de 100 volt. Por encima de este nivel de tensión, la resistencia eléctrica interior del dispositivo empieza a subir en exceso, dando lugar a una seria limitación de la corriente que entrega el drenador.

Al final de los setenta, trabajando en el laboratorio de investigación de General Electric en la neoyorquina Schenectady, se me ocurrió integrar las técnicas MOSFET y bipolar en un mismo dispositivo. Parecía razonable que, con el MOSFET controlando el bipolar, el dispositivo integrado conmutara a tensiones muy pequeñas, sin dejar de conducir corrientes de cientos de ampère. En último término, llegó a obtenerse el IGBT aunque no por un camino directo.

El primer dispositivo de potencia MOS-bipolar que construí en General Electric, en 1978, no era un IGBT sino un tiristor de puerta MOS. Este tiristor, hoy todavía en el mercado, puede entregar un impulso de corriente procedente de un condensador, por ejemplo, a un tubo de descarga gaseosa como los utilizados en instrumentos de fotolitografía. Se continúa trabajando sobre los tiristores de puerta MOS con la esperanza de encontrar un dispositivo que sustituya al tiristor controlado por puerta, de uso común en las aplicaciones de potencia más elevada.

En un IGBT, sólo hay un transistor bipolar útil (frente a los dos que comprende un tiristor), y es del tipo *p-n-p*. Este transistor es singular en varios aspectos. Por lo pronto, el transistor de potencia típico es *n-p-n*, no *p-n-p*; además, se caracteriza por una estrecha región de base y un colector grueso, ligeramente dopado. La base delgada permite que circulen grandes corrientes en el estado activo; el colector grueso y poco dopado bloquea la corriente en el estado inactivo.

Por el contrario, en el transistor *p-n-p* que forma parte del IGBT las características de base y colector están invertidas: la base es gruesa y de dopado ligero; el colector, delgado y con un dopado intenso. Para comprender el efecto de esta inversión, recuérdese que un dispositivo semiconductor de potencia ha de poder aguantar una tensión elevada entre sus terminales de salida, el emisor y el colector. En un transistor ordinario esto se logra con un colector grueso y ligeramente dopado. Pero en la práctica no pudo realizarse un IGBT con colector grueso y base delgada por razones que atañen a la fabricación de pastillas y limitaciones funcionales.

Afortunadamente, resulta que la tensión en un transistor de potencia puede bloquearse *bien* por un colector grueso y ligeramente dopado *o bien* por una base de esas mismas características. Si se escoge un colector grueso en el transistor de potencia ordinario es porque la alta ganancia de corriente exige una base delgada y de fuerte dopado.

Pero, ¿por qué no despreocuparse de la ganancia de corriente en el transistor bipolar? Precisamente ello es factible en el IGBT, puesto que es el MOSFET, con su enorme ganancia de corriente, el que proporciona la corriente de control al transistor bipolar. En otras palabras, las dos partes del IGBT se integran de suerte tal, que la corriente de canal que atraviesa el sustrato del MOSFET es también la corriente que se aplica a la base del transistor bipolar de potencia. Así, al ser tan grande la corriente suministrada a la base del transistor bipolar, bastará con que éste tenga un bajo factor de amplificación (entre uno y dos).

Como ya se ha indicado, cuando el MOSFET del IGBT se conmuta de un estado a otro se producen cortos impulsos de corrientes transitorias (del orden de miliampère). El MOSFET está controlado por tensiones cercanas a 10 volt, y el IGBT es capaz de controlar 1500 volt y 100 ampère. Con base en estos valores, puede calcularse que la ganancia de potencia de un IGBT supera los 10 millones.

Una ganancia tan elevada permite no sólo controlar el IGBT por medio de circuitos integrados (CI) relativamente delicados, sino también incluir circuitos de protección en el CI de control para evitar un fallo destructivo. Hay un evidente riesgo de tales fallos cuando el dispositivo no se utiliza bien; por ejemplo, cuando se le hace funcionar fuera de sus márgenes específicos de temperatura, corriente o tensión.

Otro atributo del IGBT reside en su notable densidad de corriente de trabajo, comparada con la de sus dos componentes, el transistor bipolar y el MOSFET. Recuérdese que la corriente que circula por el canal del MOSFET se utiliza como corriente de entrada, o de control, para el bipolar. A causa de la peculiar integración conjunta de estos dos transistores, la corriente de salida del IGBT no es la corriente emisor-colector del bipolar, como podría esperarse, sino la suma de esa corriente más la corriente de canal del MOSFET. Esas dos corrientes son aproximadamente iguales (la ganancia del bipolar sólo es de uno o dos), de tal manera que la corriente de salida del IGBT viene a ser el doble de la de cada uno de sus componentes.

Otra característica importante que potencia el rendimiento del IGBT es su resistencia eléctrica bajísima entre emisor y colector, en el estado de conducción. Esta propiedad deriva de la gran concentración de electrones y huecos inyectados en la región de base, amplia y ligeramente dopada, desde el emisor y colector adyacentes durante el paso de corriente. Tal inundación de portadores de carga eleva 1000 veces la conductividad de la base. Por esta razón, las pérdidas de potencia dentro del dispositivo son bajísimas en comparación con los MOSFET ordinarios o incluso con los bipolares. En cualquier aplicación particular, esto da lugar a una reducción proporcional de la superficie de la pastilla, que a su vez conduce a un recorte sustantivo del coste de fabricación del dispositivo.

La principal dificultad para la introducción comercial del IGBT fue la formación de lo que podría llamarse un tiristor parásito en el dispositivo. Ello se debe a la presencia de cuatro capas semiconductoras adyacentes, alternativamente de tipo *p* y de tipo *n*. Estas capas forman dos transistores bipolares efectivos (un *n-p-n* y un *p-n-p*) con una unión de colector común que permite la realimentación entre ambos, situación que tiende a provocar un fallo destructivo. El problema se solucionó combinando innovaciones estructurales, entre ellas la de añadir otra región de tipo *p* fuertemente dopada debajo de la región *n* de la fuente del MOSFET.

La rápida adopción de los IBGT en la mayoría de las aplicaciones de la electrónica de potencia no muestra señales de aminorar. Uno de los campos con mayores posibilidades de expansión es el del transporte. Además de las ventajas que en este campo da su ligereza y menor tamaño, la electrónica de potencia basada en IGBT permite trabajar a frecuencias más altas. Las compañías Fuji Electric, Mitsubishi Electric, Hitachi y Toshiba han demostrado que el funcionamiento a frecuencias elevadas proporciona un viaje más tranquilo y silencioso a los pasajeros. En Europa se está introduciendo el control por IGBT de tranvías y trenes eléctricos.

Los automóviles eléctricos e híbridos eléctricos han experimentado un intenso desarrollo, fruto de las preocupaciones por la contaminación ambiental que crean los motores de combustión interna alimentados por gasolina. La mayoría de los coches eléctricos e híbridos regulan y convierten la corriente continua que generan sus baterías en corriente alterna para el motor, mediante sistemas inversores, basados en IGBT. Se utilizan asimismo IGBT para convertir la corriente alterna en corriente continua que ha de recargar las baterías; esta conversión exige una regulación muy fina y precisa para no dañar los electrodos de la batería.

Los trenes y los coches no son los únicos vehículos eléctricos que van a aprovecharse de la precisión y potencia de los IGBT. Dentro de un esfuerzo por reducir la contaminación urbana, la Comisión de Energía de Shanghai en China producirá 150.000 ciclomotores eléctricos en 1998 y al mismo tiempo restringirá la venta de los de gasolina. La introducción generalizada de estos vehículos eléctricos exigirá disponer de medios eficaces para cargar las baterías, ya sea rápidamente en estaciones de calle o por la noche en casa.

Tal vez la aplicación más gratificante de los IGBT consista en el salvamento a diario de miles de vidas humanas en todo el mundo. Cada año, sólo en los Estados Unidos, mueren más de 350.000 personas de paro cardíaco fulminante por no tener inmediato acceso al único tratamiento eficaz, un desfibrilador externo. El volumen y el peso de estos sistemas, que producen una sacudida eléctrica para reanimar el corazón del paciente, han entorpecido su difusión. Ahora, sin embargo, una sociedad médica de Seattle llamada Heartstream comercializa un desfibrilador compacto y ligero basado en IGBT. Este equipo, aprobado en 1996 por la autoridad sanitaria estadounidense, empieza a reemplazar los grandes equipos.

Los IGBT han tenido ya otras aplicaciones en medicina, aunque menos espectaculares. Son un componente esencial de los sistemas de suministro ininterrumpido de potencia que utilizan los hospitales para garantizar un funcionamiento sin fallos del equipo médico durante las breves interrupciones de la red eléctrica. Además, los motores de los escáneres por tomografía computerizada (TAC) van controlados por IGBT para asegurar la precisión del movimiento de la unidad de rayos X al obtener imágenes por secciones del cuerpo humano.

Aplicaciones como las anteriores confirman que la técnica cumple su principal objetivo: el servicio de la humanidad. Asimismo descubren que la combinación de dos técnicas distintas puede conseguir lo que ninguna de ellas podría realizar por sí sola. La invención del transistor y su miniaturización han conducido a los complejos circuitos integrados que procesan señales digitales, corazón de la nueva era electrónica de la información. Sin embargo, es esencial una eficaz manipulación y correcto empleo de la energía eléctrica para elevar nuestra calidad de vida ejerciendo un mejor control sobre el entorno de aparatos, instalaciones y vehículos que nos rodea. Los IGBT han desempeñado un papel muy importante en satisfacer estas básicas aspiraciones.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

POWER ICS IN THE SADDLE. B. Jayant Baliga en *IEEE Spectrum*, vol. 32, n.º 7, págs. 34-49, julio de 1995.

POWER SEMICONDUCTOR DEVICES. B. Jayant Baliga. PWS Publishing, Boston, 1996.

TRENDS IN POWER SEMICONDUCTOR DEVICES. B. Jayant Baliga en un número especial de *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 43, n.º 10, páginas. 1717-1731, octubre de 1996.

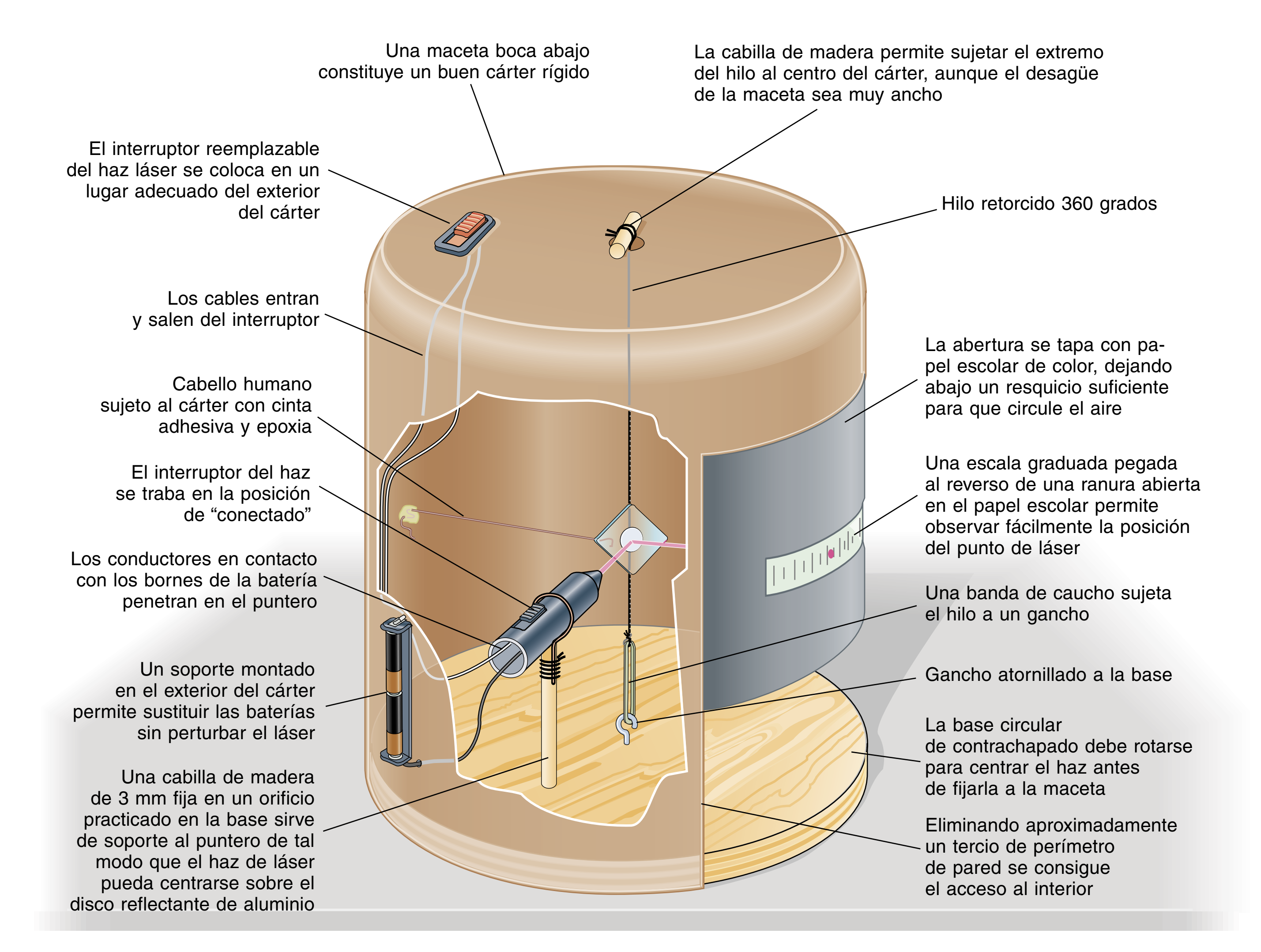
Shawn Carlson

Camarero, hay un pelo en mi higrómetro

Según donde resida el lector, la humedad podría importunarle en esta época del año más de lo que quisiera. En mi país, el cálido aire veraniego que cruza el sudeste es espeso y sofocante, mientras que en los desiertos occidentales es tan seco, que absorbe todas las humedades. Las diferencias entre las faunas de una y otra región reflejan la incidencia de la humedad, mucho más profunda que lo que induce a suponer la variación meteorológica diaria. El contenido acuoso de la atmósfera ha conformado cada milésima de la evolución en la misma medida que el contenido acuoso del suelo; y ese fenómeno plantea a los aficionados múltiples y fascinantes vías de investigación científica.

Se centre nuestro interés en la meteorología o en la biología, cualquier investigación relacionada con la humedad no puede progresar sin un instrumento para medirla. Dedicaremos este mes a un procedimiento para registrar la humedad relativa, que es el cociente entre cantidad real de agua presente en la atmósfera y la cuantía máxima asumible en las condiciones reinantes de temperatura y presión.

Por chusco que parezca, el cabello humano constituye uno de los medidores de la humedad más sensibles. El cabello se alarga cuando el agua llena sus poros minúsculos; se contrae cuando se seca. Con una fidelidad impresionante, la longitud de un cabello va, pues, a remolque de la humedad relativa. De este fenómeno podemos aprovecharnos para construir un indicador de humedad, o higrómetro, sensible y económico a la vez. El que se describe aquí recurre a un cabello humano para girar un espejo diminuto, que refleja a su vez un haz de láser sobre una escala. La posición final del haz de láser indica la humedad relativa. Aunque nuestro higrómetro no funciona a temperaturas inferiores a la de congelación, resulta ser muy versátil.



Para empezar, necesitamos un cabello humano, mejor sin rizar y medianamente largo. Lávelo a conciencia con agua y jabón para eliminar todas las grasas naturales. Hay que disponer también de una carcasa, de un cárter, para nuestro instrumento. Se requiere que el recinto escogido sea rígido, aunque de un material que admita fácil corte y perforación. Me vino de perlas una maceta de plástico de buen tamaño, como las que se destinan a plantas de interior.

También será rígido, y liviano, el reflector. Sería ideal un cubreobjetos de microscopio, pero no es muy reflectante. Solucionaremos esa limitación con pan de aluminio. Se pone una capa del mismo sobre papel duro; con un punzón corriente se perforan las dos láminas. Separemos a continuación un disco mínimo de aluminio en estado perfecto. Se le adhiere (con la cara mate hacia adentro) al centro del cubreobjetos con un toque de epoxia, frotando suavemente el pan con un pañuelo.

Nos valdrá un mondadientes para la operación inmediata: trazar un cordoncito de epoxia sobre una diagonal del reverso del cubreobjetos. Se realiza mejor ese paso si ponemos un vaso de agua boca abajo y colocamos el cubreobjetos sobre él, con el cordón de epoxia hacia arriba. Luego, se extiende bastante hilo sobre la raya de epoxia; se colgarán pequeños contrapesos en uno y otro extremo, al objeto de mantener tenso el hilo mientras se seca la epoxia. Fijaremos el cabello con un pegote de epoxia entre el centro del cubreobjetos y una esquina libre. La sensibilidad del instrumento depende del punto donde se fije el cabello: cuanto más cercano al hilo, mayor será el ángulo que gire el espejo. Ante la humedad no reaccionan por igual todos los cabellos; no existe, pues, una receta de validez general para todos los higrómetros. Necesitamos tantear hasta determinar el mejor punto del cubreobjetos donde fijar el cabello.

Tras secarse la epoxia, se instala el reflector de vidrio dentro del cárter del instrumento, sujetando un extremo del hilo a la parte superior y el otro al fondo, con una banda de caucho para mantenerlo tenso. Al mirar directamente al reflector, el cabello debe hallarse en el reverso del cubreobjetos y a la izquierda del centro; de ese modo, la escala de humedad crece de izquierda a derecha. Antes de sujetar el extremo libre del cabello al cárter, hay que rotar una vez el reflector en torno al hilo en sentido horario. En virtud del par de fuerzas resultante, el reflector tirará del cabello conforme el hilo tienda a enderezarse.

Un puntero de láser es una fuente de luz ideal. Genera un punto excepcionalmente luminoso que se ve sin dificultad, incluso bajo luz diurna. Se expende en Radio Shack y otros suministradores de material electrónico. Importa que el puntero se instale desde un principio de modo que no deba volverse a tocar, ya que el más leve golpe involuntario desbaratará la calibración del instrumento. El truco consiste en dotar al puntero con un interruptor y baterías montados en el exterior del cárter del higrómetro.

Para instalar el puntero en sí, cortaremos una cabilla de madera de la longitud apropiada; sujetamos a uno de sus extremos el puntero. Si la envuelta del puntero es plana, se pega con epoxia directamente al extremo de la cabilla. Si la envuelta es redonda, se la ciñe con unas cuantas vueltas de alambre de percha. A la cabilla quedarán, por fin, atados los extremos del alambre, según ilustra la figura. Fijaremos el conjunto con una generosa capa de epoxia.

Para crear la escala, podemos trasladar con una fotocopiadora el marcado de una regla fina a una hoja de papel y con unas tijeras recortar la graduación, reduciéndola a tiras de unos cinco centímetros de ancho. Pegamos la escala sobre una ranura rectangular que hayamos abierto en un papel escolar oscuro; fijamos el papel al cárter de suerte que el haz de láser incida sobre la escala por detrás. Si tenemos intención de emplear el instrumento en ambientes muy húmedos, debemos proteger las partes de papel del alabeo plastificándolas. Ello puede hacerse con un aerosol de plástico.

Una vez terminado, calibraremos el higrómetro. Primero, iremos al cuarto de baño y abriremos la ducha. Conforme aumenta la humedad, veremos que el punto luminoso se desplaza hacia la derecha. (Si no hemos plastificado las partes de papel, ciérrese la ducha en cuanto el espejo del cuarto de baño esté cubierto de una capa fina de condensación para no recargar el aire con humedad.) Cuando el aire haya alcanzado su plena saturación, se marca la posición del punto sobre la escala. Puesto que los higrómetros de cabello reaccionan muy despacio a las variaciones de humedad, habrá que esperar al menos 20 minutos antes de marcar la escala. Ese punto representa una humedad del 100 por ciento.

Puede conseguirse una humedad casi nula colocando en la base del higrómetro una sustancia que absorba pronto la humedad y encerrando herméticamente el instrumento dentro de un saco de plástico. Son varios los productos que sirven para absorber la humedad; por citar algunos, gelatina en polvo, carbón activo y esos paquetes de silicagel que muchas veces se encuentran dentro de los embalajes al hacer una compra. El cloruro de cobalto, que puede comprarse en cualquier distribuidor de productos químicos, es el desecante preferible, pues cambia de azul a rosa a medida que absorbe humedad. Si en el saco quedan muchos cristales azules, cuando el punto luminoso deje de desplazarse hacia la izquierda, podemos estar seguros de que en el aire interior la humedad es casi nula. Cualquiera que sea la sustancia desecante empleada, convendrá asegurarse, antes de introducirla en el saco, de hornearla a 150 grados al menos durante una hora para eliminar toda el agua absorbida.

En general, la escala de humedad no es lineal entre las marcas del cero y el 100 por ciento. Deben comprobarse varios puntos intermedios con un instrumento bien calibrado. Un procedimiento fácil para hacerlo (si bien indirecto) es colocar el instrumento en el exterior y comparar nuestras mediciones con las lecturas del servicio meteorológico local.

Una vez calibrado, el instrumento permite realizar experimentos diversos. Con él podemos medir la velocidad de evaporación desde suelos de distintos tipos hacia el aire bajo temperaturas variadas. O podemos observar a qué velocidad transpiran diferentes especies de plantas bajo distintas condiciones de luz y temperatura. Para llevar a cabo esos ensayos con más eficacia, pudiera recomendarse modificar el higrómetro para que genere una señal electrónica, más fácil de registrar que la posición del punto luminoso del láser. En sus páginas Web, la Society for Amateur Scientists expone sugerencias a la hora de acometer tales modificaciones.

Para información acerca de este y otros proyectos para aficionados, visite la sección Forum de la Society for Amateur Scientists en http:// web2.thesphere.com/SAS/WebX.cgi en la World Wide Web. Puede también escribir a la sociedad al 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, Ca 92117, o llamar al 619-239.88.07.

Ian Stewart

Relaciones bien cimentadas

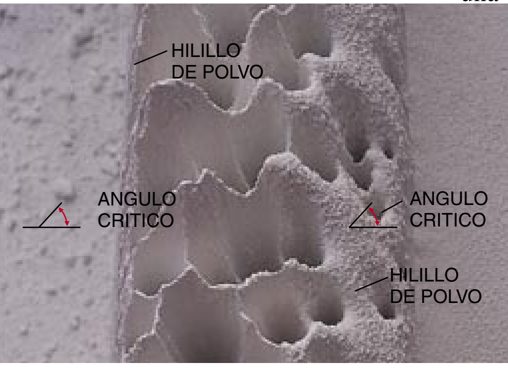
La prestigiosa revista *Nature* logra conjuntar artículos de investigación de alta potencia con colaboraciones misceláneas. Una de sus secciones fijas es *Arte y Ciencia*, título que se explica por sí solo. En el número del 11 de diciembre de 1997, Martin Kemp, historiador del arte, describe los notables paisajes del artista londinense Jonathan Callan. A diferencia del paisajismo habitual, las obras de Callan no son pinturas, sino esculturas. Y es inverosímil que sus paisajes puedan verse en la Tierra, y, si me apuran, en cualquier otro mundo conocido. Se trata de formas tridimensionales creadas espolvoreando cemento sobre un tablero perforado.

Kemp, que enseña en la Universidad de Oxford, apunta una relación entre las esculturas de Callan y ciertos trabajos recientes en teoría de complejidad. Los fantásticos paisajes de Callan parecen estar regidos por ciertos principios generales; por ejemplo: los picos más altos del cemento se producen en las regiones más alejadas de los orificios. En carta al editor, en un número posterior de *Nature* (29 de enero de 1998), Adrian Webster, astrónomo del Real Observatorio de Edimburgo, señala que la curiosa geometría de los paisajes de Callan admite interpretación en el marco de una rama clásica de la matemática, la teoría de células de Voronoi. Explica, asimismo, de qué modo las células de Voronoi ilustran uno de los grandes descubrimientos recientes de la astronomía, la distribución "espumosa" de materia en el universo. Si alguna vez se ha dispuesto de un ejemplo de la unidad de la matemática, el arte y la ciencia, éste ha de serlo.

Desde las primeras pinturas rupestres, los artistas se han valido de procesos de la física y la química para crear sus obras maestras. Los escultores de la Grecia y la Roma clásicas tenían que comprender el modo de fracturar la piedra y la manera de fluir del bronce fundido en un molde. Los pintores del Renacimiento estudiaron las propiedades de los pigmentos. La técnica tradicional del artista ha consistido en saber controlar estos procesos físicos, en valerse de ellos para modelar las esculturas y plasmar en el lienzo las formas deseadas. Callan pertenece al reducido grupo de artistas modernos que han abandonado ese modelo. Dejan éstos que sean los procesos físicos y químicos de sus elementos plásticos los que determinen los rasgos principales de sus obras de arte.

Callan da comienzo a cada escultura perforando en un tablero horizontal un patrón aleatorio de orificios. A continuación, cierne uniformemente cemento en polvo sobre el tablero. Un poco de cemento se cuela por las perforaciones; el resto se apila en las regiones del tablero comprendidas entre los orificios. La escultura absorbe la humedad del aire y se endurece. El resultado final se asemeja a un paisaje lunar, con dentados picachos circundando a cráteres muy empinados. Callan compara la escultura con una cadena montañosa terrestre: "Una geografía que parece a la vez eminentemente natural y sumamente artificial, como unos Alpes recién fabricados."

Una comparación más idónea podría asimilar las obras de Callan a una colección de montones de arena. En ingeniería se conoce, desde hace mucho, el amontonamiento de los áridos, como la arena, la tierra o el cemento en polvo. La propiedad más sencilla e importante de los montones es la existencia de un "ángulo crítico". Hay una pendiente máxima, dependiente de la naturaleza del árido, que no puede rebasarse sin desencadenar el desplome. Esta pendiente forma un ángulo constante con el suelo, el ángulo crítico. Si seguimos aportando arena, haciendo el montón cada vez más alto —por ejemplo, vertiéndola en un delgado hilo— la ladera de la pila se irá haciendo cada vez más pina, hasta alcanzar el ángulo crítico. Cualquier grano de arena que se añada irá entonces rodando montón abajo, provocando una diminuta avalancha o una grande, haciendo que la ladera conserve una pendiente constante. En este modelo, el más



1. CRATERES DENTADOS que "pican" la superficie de una de las esculturas en cemento de Jonathan Callan (*foto de la izquierda*). Las laderas de cada cráter tienen la misma inclinación que la superficie lateral de un montón cónico de cemento (*izquierda*).

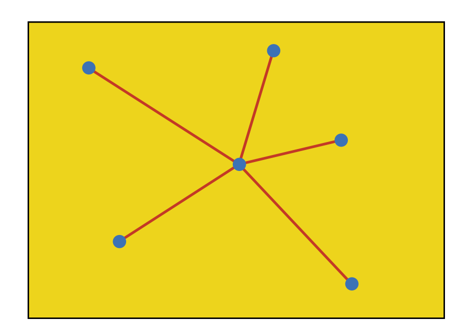
sencillo, el estado estacionario corresponde a un cono cuyas generatrices tienen una inclinación exactamente igual al ángulo crítico.

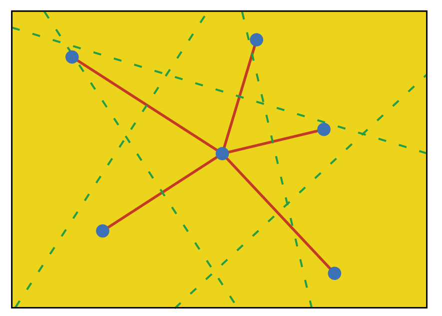
En teoría de complejidad se estudia el proceso que confiere esta forma a la ladera, así como la naturaleza de las avalanchas, grandes o pequeñas, que acompañan a su crecimiento. El físico danés Per Bak acuñó la expresión "criticalidad auto-organizada" para describir tales procesos, los cuales —ha sugerido— sirven de modelo para muchos fenómenos del mundo natural, en especial, la evolución (en la cual, las avalanchas no son granos de arena, sino especies, y los montones corresponden a un espacio imaginario integrado por posibles organismos).

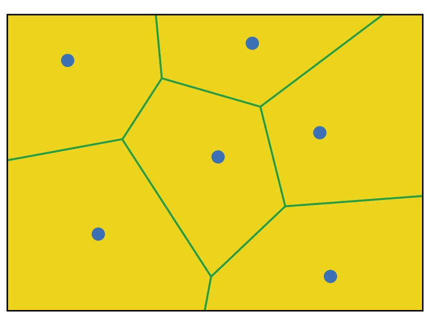
En las obras de arte de Callan, la estructura del polvo de cemento que rodea a cada orificio es inversa del montón de árido, típica de la ingeniería. Imaginemos un tablero horizontal con un solo orificio. Lejos del agujero, el cemento se eleva en todas las direcciones según el ángulo crítico, creando una depresión cónica cuyo vértice apunta hacia abajo, descansando en el centro del agujero. Estos conos invertidos son los cráteres que componen los paisajes de Callan.

Pero, ¿cuál será la geometría cuando haya varios orificios? Ahora, lo esencial es que el cemento vertido que se deslice pendiente abajo y se cuele a través de la tabla, caerá por el orificio que se encuentre más próximo a su punto de impacto inicial. Por consiguiente, resulta posible pronosticar dónde se hallarán las fronteras que separan los cráteres cónicos. Dividamos el tablero en regiones circundantes en torno a los orificios, de modo tal que cada región esté constituida por los puntos más cercanos al punto elegido. Tal región es, por así decirlo, la "esfera de influencia" del orificio, aunque, en realidad, no es una esfera, sino un polígono. Suponiendo que el tablero se encuentre horizontal, las fronteras entre estas regiones se hallan directamente debajo de las divisorias comunes de cráteres adyacentes.

Una forma de esbozar una de estas regiones consiste en elegir un orificio cualquiera y trazar segmentos rectilíneos desde su centro hasta los centros de todos los demás agujeros. Señalemos el punto medio de cada segmento y dibujemos, por ese punto, otra recta que forme ángulo recto con el segmento en cuestión (la llamada mediatriz). El resultado será un conjunto de mediatrices que se cortan entre sí, creando una red. Para cada uno de los centros, hallemos la malla, esto es, la mínima región convexa, limitada por segmentos de tal red, que lo contenga. Esta región se denomina célula de Voronoi. Cada orificio está rodeado por una única célula de Voronoi, las cuales, reunidas, constituyen una pavimentación del plano. Georgii F. Voronoi (1868-1908) fue un matemático ruso que trabajó en teoría de números y en teselaciones multidimensionales. Las células de Voronoi reciben también otros nombres, como, por ejemplo, dominios de Dirichlet y células Wigner-Seitz, porque han sido redescubiertas en nuevos contextos.







2. LAS CELULAS DE VORONOI pueden ser dibujadas trazando las mediatrices de los segmentos que conectan los orificios.

Los cráteres de Callan se alzan, pues, en forma de cono invertido con el mismo ángulo crítico y se cortan sobre los bordes de las células de Voronoi definidas por este sistema de perforaciones. Una consecuencia cómoda de esta geometría es que, al encontrarse dos pendientes, lo hacen a una misma altura sobre el tablero, es decir, no se presentan discontinuidades nítidas. Cabe deducir otra propiedad, menos obvia: la forma de la cresta en que cada cráter corta a su vecino. En abstracto, lo que tenemos son dos conos invertidos que se elevan con ángulos idénticos. Los conos se cortan sobre la mediatriz del segmento que une los vértices, esto es, sobre la frontera de Voronoi. Consiguientemente, su intersección se encuentra en el plano vertical que pasa por esa línea de frontera intercelular. ¿Qué curva se obtiene al cortar un cono por un plano vertical? La conocían ya los matemáticos griegos: una hipérbola. Tal hecho contribuye a explicar la naturaleza, bastante aserrada, de los paisajes de Callan.

¿Qué relación existe con la astronomía? En vez de agujeros en el plano, imaginemos puntos en el espacio tridimensional. En el plano, la mediatriz —la perpendicular a un segmento en su punto medio— es una recta. Pero en el espacio, la figura correspondiente es el plano mediador. Tracemos los planos mediadores de todos los segmentos que unen un punto con todos los demás. La célula de Voronoi del punto es la mínima región convexa que contiene al punto y está limitada por regiones de los planos mediadores. La célula de Voronoi es ahora un poliedro. Los astrónomos han descubierto que, a gran escala, la distribución de la materia en el universo se asemeja a una red de tales poliedros. La mayoría de los cúmulos galácticos parecen estar ubicados en las fronteras de células de Voronoi contiguas. Esta organización ha sido llamada "modelo de espuma de Voronoi" del universo, porque lo hace parecerse a un inmenso baño de burbujas.

Tenemos una analogía, imperfecta, pero esclarecedora, en la distribución de cemento en polvo de los paisajes de Callan. En sus esculturas, el cemento alcanza altura máxima a lo largo de las fronteras de Voronoi. La propiedad análoga en el espacio tridimensional sería que la materia, al expandirse el universo, se concentra sobre esas mismas fronteras. Esta sencilla idea alberga en sí elocuentes formas artísticas, matemáticas de gran elegancia, y profundos hechos físicos que atañen a la estructura del universo.

NEXOS

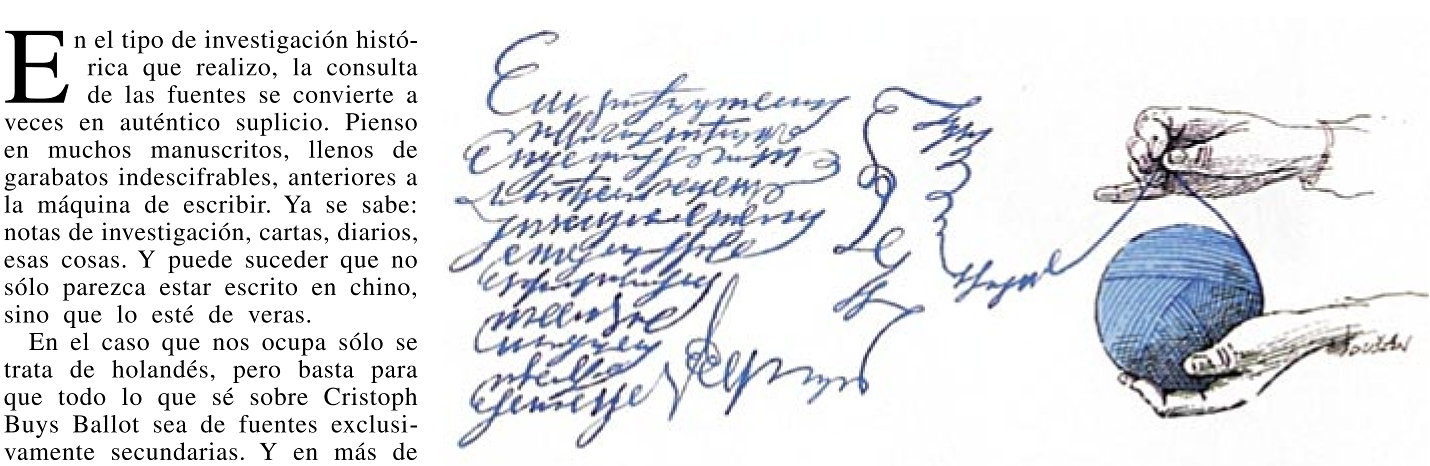
James Burke

Garabatos

En el tipo de investigación histórica que realizo, la consulta de las fuentes se convierte a veces en auténtico suplicio. Pienso en muchos manuscritos, llenos de garabatos indescifrables, anteriores a la máquina de escribir. Ya se sabe: notas de investigación, cartas, diarios, esas cosas. Y puede suceder que no sólo parezca estar escrito en chino, sino que lo esté de veras.

En el caso que nos ocupa sólo se trata de holandés, pero basta para que todo lo que sé sobre Cristoph Buys Ballot sea de fuentes exclusivamente secundarias. Y en más de un sentido, si se considera que la aportación principal de este científico holandés es una ley que enuncia que la dirección del viento y el gradiente de presión forman un ángulo recto. Resulta mucho más interesante la colaboración que le brindó una banda de música montada en un tren en Utrecht en 1845. Encargó a estos trompetistas que tocaran la misma nota de forma sostenida mientras el tren se aproximaba a un grupo de amigos de Buys Ballot y que siguieran tocándola mientras se alejaban. Estos amigos confirmaron haber oído que el sonido se hacía más agudo a medida que el tren se acercaba y más grave cuando se alejaba.

Un desconocido profesor de matemáticas austríaco, Christian Doppler, lo había predicho tres años antes. De hecho, su comunicación científica se refería al desplazamiento de la luz proveniente de una estrella hacia los extremos azul ("altas frecuencias") y rojo ("bajas frecuencias") del espectro, según ésta se aproximara o alejara, respectivamente. Sustitúyase "sonido" por "luz". Este fenómeno se conoce como efecto Doppler (en honor a ese ya famoso austríaco). En 1859 Gustav Kirchoff y Robert Bunsen (el del mechero) encontraron, finos experimentalistas ellos, su aplicación práctica con su nuevo espectrógrafo al demostrar que el desplazamiento de la luz de las estrellas a lo largo de las líneas del espectro permitía medir su velocidad. Ciencia de primera clase.



Uno de sus ayudantes, que pasó con ellos el invierno de 1871 en Heidelberg, desarrolló una fijación de carácter opuesto al de las candentes estrellas. Heike Kammerlingh Onnes sentía fascinación por lo que ocurre cuando las cosas se enfrían mucho. Con la ayuda de gases en estado líquido consiguió enfriar materiales hasta temperaturas pocos grados por encima del cero absoluto y descubrió la superconductividad. El francés Louis-Paul Cailletet logró en 1877 licuar el oxígeno, lo que fue para Onnes de gran ayuda en sus investigaciones. Cailletet despuntó también en aeronáutica y diseñó una máscara que estaba conectada a una botella de oxígeno que permitió a los tripulantes de los globos alcanzar mayores alturas.

Y ahora que hablamos de paseos por las nubes, Paul Bertet, contemporáneo de Cailletet, investigó los efectos que produce el oxígeno puro cuando se aspira en cantidades excesivas. Aunque también se le conoce por sus trabajos seminales sobre la reacción de la mimosa al rozamiento (merece la pena comprobarlo), Bert disfrutó de horas felices en una cámara de presión de su propio diseño, ocupado en asuntos como la hipoxia y otras experiencias que producen alteraciones corporales o de la consciencia. En ocasiones, su felicidad podría haberse atribuido al hecho de que se estaba esforzando por desentrañar las presiones de distintos gases que se requieren para obtener la cuantía exacta de anestesia en una operación quirúrgica. Uno de los gases en cuestión era el óxido nitroso, el "gas de la risa".

El catecismo sobre el N_2O se remontaba a 1800 y lo había redactado Humphry Davy, en sus días de profesor en la Institución Pneumática Clifton, en el occidente de Inglaterra. No tardó Davy en convertirse en figura principal de la ciencia británica, un caballero, arquetipo sobre el que Mary Wollstonecraft Shelley espejó la fama de *Frankenstein*. Ganador de todos los honores conocidos, incluido, se dice, un premio otorgado por Napoleón, pese a que por entonces ingleses y franceses se llevaban a muerte. El gas de Davy puso de moda los cenáculos de N_2O, donde los científicos se apalancaban en bien exclusivo de la ciencia. Por desgracia, en una onda mucho más seria, Davy no pudo demostrar que el gas curaría todas las enfermedades.

Según hábito entre los sabios de aquellas calendas, Davy echó su cuarto a espadas en la poesía, sobre cuyo particular merece añadirse alguna apostilla. Cuando se convirtió en aplaudido conferenciante de la Regia Institución de Londres, entre los admiradores de sus poemas encontramos a Samuel Taylor Coleridge y

Robert Southey, figuras desmadejadas del Romanticismo, a quienes Davy había conocido durante su estancia en Clifton.

En 1819 Southey pasó algún tiempo recorriendo los Highlands escoceses con otro tipo eminente que se había labrado su propia fortuna, Thomas Telford. Desde los romanos, nadie había aventajado a éste en la construcción de carreteras y puentes. Suyas fueron también dos obras maestras de la ingeniería de todos los tiempos: el acueducto de Pontcysyllte, en Gales, y el Canal Caledoniano de Escocia, ante cuya magnificencia se dejó llevar por las musas. En una trayectoria vital empedrada de éxito sobre éxito (las infraestructuras eran lo suyo), el único fracaso de su vida se produjo en 1800, cuando proyectó un puente sobre el Támesis en Londres. La elite ingenieril pensó que ganaría la adjudicación. Pero el gobierno no tenía fondos para los gastos de expropiación de ambas márgenes.

Entre los miembros de la comisión del puente reticentes que hundió el proyecto de Telford galleaba un joven despierto, Thomas Young. Un personaje odioso donde los hubiera. Conocía cuantos lenguajes se mencionan en las Escrituras, descifró los jeroglíficos egipcios, disertó ante la Regia Institución y ejecutó el famoso experimento que parecía demostrar que los haces ópticos procedentes de fuentes diferentes producían patrones de interferencia porque la luz viajaba en ondas. Aceptado, pero ¿en qué medio se movían las ondas?

Ese medio luminífero misterioso recibía el nombre de éter. Su búsqueda trajo de cabeza a la ciencia victoriana. Hermann von Helmholtz, la figura alemana del momento, delegó ese asunto menor en un discípulo (Heinrich Hertz, cuyas investigaciones en torno a la posibilidad de que la radiación electromagnética viajara también de forma ondulatoria por el éter, crearía las condiciones para el advenimiento de la radio).

El propio Helmholtz tenía antes otra pieza que cobrarse, a saber, minar la teoría "vitalista", dominante a la sazón y según la cual los procesos de la vida reclamaban una suerte de "fuerza" no sujeta a medición. Tesis que Helmholtz rebatió al mostrar que la velocidad de una señal por el nervio ciático era exactamente de 27 metros por segundo. Pero propio de toda teoría vitalista es sobrevivir, ¿no? Así, en 1900 se seguía defendiendo, gracias a la tenacidad de un tal Ludwig Klages, psicólogo y fundador de la ciencia de la "caracterología".

La otra cosa que Klages hizo (que le puso en aprietos con los nacionalsocialistas y se vio obligado a poner tierra por medio refugiándose en Suiza) fue el desarrollar una técnica para analizar el carácter con tal precisión, que los nazis lo emplearían en su programa de selección de los mandos. Podía haberme fijado en la estrategia de Klages cuando intentaba poner en claro los garabatos de Christoph Buys Ballot. Puesto que la contribución clave de Klages al conocimiento humano fue sistematizar el estudio de la escritura.

Fármacos

Búsqueda sin término

EL MITO DE PANACEA. COMPENDIO DE HISTORIA DE LA TERAPÉUTICA Y DE LA FARMACIA, por Francisco Javier Puerto Sarmiento. Doce Calles; Madrid, 1997. **GESCHICHTE DER ARZNEIMITTELTHERAPIE**, por Wolf-Dieter Müller-Jahncke y Christoph Friedrich. Deutscher Apotheker Verlag Stuttgart; Stuttgart, 1996. **LA FARMACIA. IMPRESIONES HISTÓRICAS**. Dirigido por Regine Pötzsch. Ediciones Roche; Basilea, 1996.

RICETTARI MEDICO-FARMACEUTICI MEDIEVALI NELLA FRANCIA MERIDIONALE, por Maria Sofia Corradini Bozzi. Leo S. Olschki editore; Florencia, 1997**. PIETRO ANDREA MATTIOLI, SIENA 1501–TRENTO 1578**. Dirigido por Sara Ferri. Quattroeme; Perugia, 1998.

ÜBER DIE ANFÄNGE DER PHARMAZIEGESCHICHTSSCHREIBUNG. VON JOHANNES RUELLIUS (1529) BIS DAVID PETER HERMANN SCHMIDT (1835), por Evemarie Wolf. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart; Stuttgart, 1996**. LEARNING TO HEAL. MEDICAL PROFESSION IN COLONIAL MEXICO 1767-1831**, por Luz María Hernández Sáenz. Peter Lang; Berna, 1997.

FIFTY YEARS OF ANTIMICROBIALS: PAST PERSPECTIVES AND FUTURE TRENDS; Cambridge University Press; Cambridge, 1995.

La enfermedad y la salud dan la doble cara de la moneda de la vida. Puesto que entre ambas no cabe transacción perdurable, el hombre —desde el chamán prehistórico hasta el bioquímico de nuestros laboratorios— ha buscado en las medicinas ganar la partida. Por ensayo y error, por golpes de fortuna sobre todo, se avanzó a trancas y barrancas durante milenios. El paso se hizo firme tras el establecimiento de la química orgánica y el progresivo conocimiento del mecanismo de acción de los fármacos. Para seguir esa evolución, tres obras de factura dispar se aprestan a ayudarnos: *El mito de Panacea*, *Geschichte der Arzneimitteltherapie*, y *La Farmacia. Impresiones Históricas*.

Puerto sitúa la historia de la farmacia en el marco general de la historia de la ciencia, desde el "Australopiteco" hasta Carlos Pau, boticario y botánico español que murió en 1937. Entre ambos hitos desgrana su relato de acuerdo con una periodización de sabor lainiano: terapéuticas pretécnicas; terapéuticas arcaicas extinguidas (Mesopotamia, Egipto, Irán antiguo, América precolombina); terapéutica en las culturas arcaicas pervivientes (India, China e Israel); Grecia: configuración de la terapéutica técnica; terapéutica helenística; Edad Media; terapéutica y farmacia durante el Renacimiento; terapéutica y farmacia durante el Barroco; terapéutica y farmacia durante la Ilustración; terapéutica y farmacia durante el Romanticismo y el Positivismo.

Agrega siempre un apartado español al capítulo estudiado. Compila abundantísima información de autores y obras. Pero, ¿es aprovechable? La falta de índices y los vaivenes un tanto erráticos de cuestiones y escuelas dificultan el manejo de un texto que no rezuma un trato excesivo con las fuentes. A modo de muestra: "el andalusí Ibn al-Baytar (cordobés muerto en 1248) quien, en su *Kitab al-yami li-mufradat* [falta: *al-adwiya wa*] *al-adwiya* o *Colección de nombres de alimentos y medicamentos simples*, recoge más de 1400 medicamentos de origen vegetal y mineral organizados por orden alfabético..." Esto en la página 163. Sólo tres planas más adelante: "Discípulo suyo fue Diya al-din Abu Muhammad Abd Allah ibn Ahmad, llamado Ibn al-Baytar de Málaga (m.1248); llegó a jefe de los herboristas de palacio en El Cairo y escribió la *Colección de nombres de alimentos y medicamentos simples*, en donde recogía más de mil cuatrocientos medicamentos simples de origen preferentemente vegetal, pero también animal y mineral." A propósito de Leoniceno: "luego comienzan a aparecer textos en donde se critica la inexactitud de algunos clásicos, prototipo de los cuales sería el de Niccolo Leoniceno (1428-1524), *Plinii... erroris notati* (1492)..." (p. 239); "Nicolás Leoniceno, en 1509, da a la imprenta su *Plinii aliorumque medicorum erroribus*" (p. 272).

Si producen incomodidad esas ligerezas, menos se entiende la dispersión de la obra de un mismo autor. Por ceñirnos a otra figura señera, la de Francisco Carbonell y Bravo: "y en Barcelona, en donde Francisco Carbonell y Bravo (1786 [debe decir 1768] –1837) imparte clases de Química, a partir de 1803, en la Real Junta de Comercio y publica su modernísima *Pharmaciae Elementa Chemiae recentioris fundamenta inixa* (Barcelona, 1796)", leemos en la página 473. Trece después: "Carbonell es autor del *Pharmacia elementa Chimiae recentoris fundamentis inixa* (Barcelona, 1796); el único texto original escrito de acuerdo a las nuevas teorías químicas por este farmacéutico y médico, formado en España y Francia y profesor, luego en la escuela de Química de la Lonja de Barcelona." Y luego en la página 569: "En España comienza el siglo con un texto deslumbrante de Francisco Carbonell y Bravo, el *Pharmaciae Elementa* (Barcelona, 1796) publicado en 1802 en castellano como *Elementos de Farmacia fundados en los principios de la Química moderna*, traducidos al francés, italiano, alemán y reeditados en latín (París, 1800). Este texto, único aceptado por la comunidad científica internacional de los escritos por un farmacéutico de la época, está dividido en siete capítulos de los que sólo el cuarto se dedica a la preparación de los medicamentos." En las ediciones que el crítico ha manejado el capítulo consagrado a la preparación es el segundo, no el cuarto.

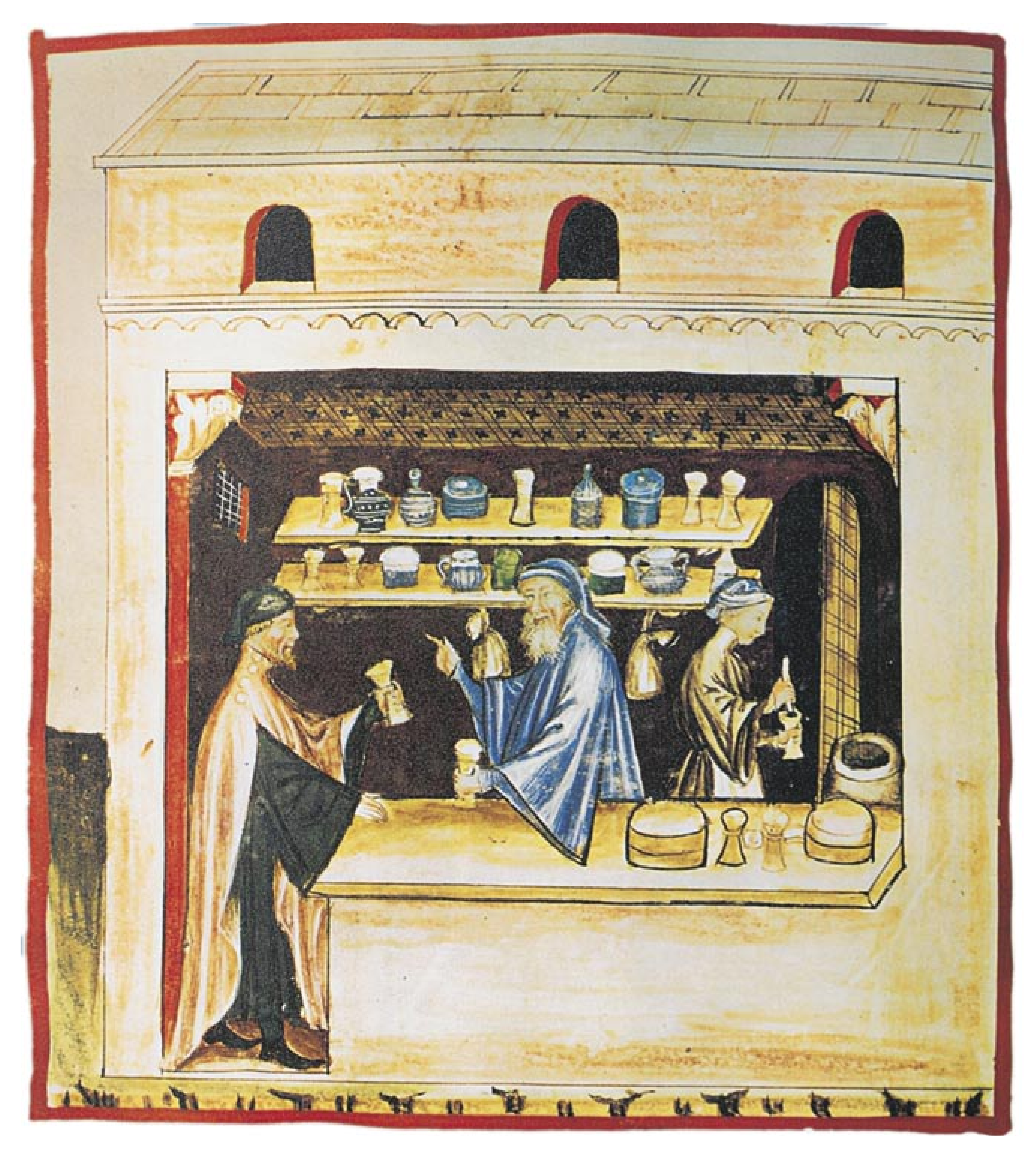
En ocasiones la vertebración de escuelas y doctrinas podría dejarse ver con mayor claridad. Sin salirnos de Barcelona, ni del período anterior, podría haberse señalado, y explicado, el hilván Rancé-Cullen-Juanich. Se pone de manifiesto en el prólogo que este último puso a su *Tratado elementar de Materia Medica Externa*, no citado por Puerto.

Venta de triaca en una botica medieval. Miniatura italiana del Tacuinum Sanitatis. *Códice conservado en la Biblioteca Nacional de Viena*

Con 340 páginas menos que *El mito de Panacea*, el manual de Wolf-Dieter Müller-Jahncke y Christoph Friedrich es otra cosa. Ordenado por temas, la *Geschichte der Arzneimitteltherapie* mira, sobre todo, la farmacología reciente, sin ahorrar un sólido recorrido histórico que salpica con series cronológicas y sumarias biografías.

El libro se reparte en cuatro secciones. Aborda en la primera los conceptos terapéuticos y farmacéuticos fundamentales; vale decir, patología de los humores y teoría de los cuatro elementos, patología celular, teoría de receptores, homeopatía y formas de administración. La segunda sección describe el desarrollo de nuevas drogas desde la antigüedad hasta el siglo XIX, con ponderada atención en el cambio que supuso la introducción de medicinas del Nuevo Mundo, para seguir con el descubrimiento de los principios activos y el mecanismo de acción de los medicamentos.

Del máximo interés son las secciones restantes, que tratan de los remedios contemporáneos, donde cada grupo farmacológico merece capítulo aparte. Distinguen entre fármacos de origen natural y sintéticos. Bajo los naturales se abrigan desde glucósidos hasta las vacunas, pasando por vitaminas, hormonas y antibióticos. Las sustancias sintéticas resumen lo que



cabe esperar de un tratado al día de química farmacéutica.

Aunque bien trenzada, *La Farmacia* se aleja de la pretensión escolar de los anteriores. Es un conjunto de 22 retazos pespunteados por Regine Pötzsch y espléndidamente traducidos por Fernando A. Navarro. Las impresiones de que habla el subtítulo reflejan momentos del mundo clásico, precolombino, etcétera. Por ser heredera de la terapéutica clásica y determinante de la moderna, pese al vituperio humanista, recalaremos en la farmacia islámica medieval, resumida por Jutta Schönfeld.

"Todo cuanto ingerimos, voluntaria o involuntariamente, puede clasificarse, expone en el siglo X al-Biruni, ante todo en alimentos y venenos. Entre ambas categorías se sitúan los medicamentos..., pues en comparación con los alimentos son peligrosos y en comparación con los venenos son salutíferos." De acuerdo con la doctrina griega de los elementos, las cualidades y los humores, fundamento de la fisiología árabe, la acción somática de los alimentos, fármacos y venenos se atribuía al proceso de su conversión en los humores. Partidarios de un tratamiento escalonado, sitúan entre los medicamentos y los alimentos los "alimentos farmacológicos" y, entre los medicamentos y los venenos, los medicamentos tóxicos.

Había que empezar por los remedios simples. Así llamaban a los fármacos de origen vegetal, animal o mineral. Se divulga la lista de todos, sus sinónimos y propiedades de cada uno. Cuando no resultaban eficaces los simples se acudía a los compuestos, detallados en formularios, recetarios y antidotarios. En sus prescripciones, fiaban, en última instancia, en la *Materia médica* de Dioscórides y en los múltiples textos farmacológicos de Galeno.

Dentro de los remedios simples, las plantas constituyen el grupo principal. Con las hierbas medicinales propiamente dichas, se recomiendan cereales, verduras, frutas. Concedían capital importancia a una dieta equilibrada para mantener o recuperar la salud. Hábiles en la preparación de la carne y exigentes en el origen del pescado. Impregnan de elementos mágicos la aplicación de los remedios minerales; a partir de la fuerza ejercida por el imán sobre el hierro, dedujeron la existencia de otros influjos ocultos entre las cosas y los seres vivos, que explicarían los poderes de los amuletos.

Los árabes refinaron la proporción de los remedios compuestos, transmitidos en los *aqrabadin* o *qarabadin*. En estos antidotarios, los remedios se ordenaban por órganos enfermos o según su modo de administración. Lo hallamos puntillosamente documentado en los *Ricettari medico-farmaceutici medievali*, de Maria Sofia Corradini, un estudio sistemático de la farmacia occitana.

En las regiones de Toulouse, Perpignan, Marsella y Montpellier circularon en la baja Edad Media numerosos regímenes de sanidad, tratados de anatomía, herbarios y, sobre todo, recetarios de origen diverso para consumo de barberos y boticarios o como guión para el examen de capacitación al que debían someterse. Predominaba el latín y el francés. Los textos occitanos están, en su mayoría, inéditos.

Corradini publica las recetas médico-farmacéuticas comprendidas en los manuscritos de *Princeton* (Garrett 80), *Auch* (Archiv. dép. du Gers I 4066) y *Chantilly* (Musée Condé 330). El códice *Princeton* consta de un pergamino latino del siglo XIV y de un pergamino occitano del siglo XIV. El manuscrito latino versa sobre el *Thesaurus Pauperum*; el occitano aporta un recetario, la *Carta de Hipócrates a César* y un herbario.

El códice *Auch* data del siglo XV y está escrito en occitano con una mínima parte en latín. Contiene un herbario, recetas de alquimia, recetas veterinarias, la *Carta de Hipócrates a César* y otros. En el códice *Chantilly* se conjugan occitano, francés y latín. Presenta el *Thesaur de pauvres*, remedios para las fiebres, grupo de recetas, tratado de anatomía, herbario, grupo de recetas, *Le Livre des secrés des femmes*, un tratado ginecológico y un tratado del mester de barbería.

Resultan manifiestos los puntos de convergencia en los tres códices. Del cotejo de los herbarios, por ejemplo, se desprende que nos hallamos ante redacciones variables de un mismo texto base, el *De viribus herbarum*, un poema técnico de más de dos mil hexámetros de Odo de Meudon. En el herbario se manifiesta la doctrina de Galeno, ampliada por Oribasio. Las hierbas abordadas por Odón son 77, de ellas 33 tienen cabida en al menos uno de los testimonios occitanos. En todas las versiones aparece un núcleo compacto integrado por la artemisa, abrótano, ajenjo, ortiga, ajo y llantén.

La *Carta de Hipócrates a César* se difundió también con el título *Regimen sanitatis ad Caesarem*. En su origen parece que combinaba dos breves tratados sobre los cuatro humores y las orinas seguidas de recetas ordenadas "de la cabeza a los pies", según una costumbre consolidada en la práctica medico-farmacéutica.

Con estos mimbres llegamos a finales del siglo XV, acuciado por un sentido crítico radical que exige, en farmacia, saber lo que se receta y se expide. En auxilio de esa exigencia acuden las traducciones latinas de la *Materia médica* de Dioscórides, con sus cotejos de códices y glosas interpretativas. Aunque la primera versión latina, de Pietro Padovano, se imprimió en 1478, gozaron de autoridad la de Marcello Virgilio Adriani, Hermolao Barbaro y sobre todo la de Jean Ruell. A todas barrió la de *Pietro Andrea Mattioli*, figura clave del Renacimiento estudiada en un libro colectivo del mismo título.

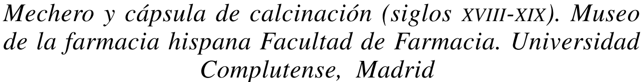
No tardaron en establecerse cátedras "de simples", cubiertas en un comienzo por profesores de otras disciplinas aficionados a la materia. En pocos años, más que de autores, debe empezarse a hablar de escuelas: la alemana de Brunfels, la ferrariense de Leoniceno, la francesa de Ruell. Irradiando luz la figura ágrafa de Ghini. Con el impulso que dio al estudio sistemático en los recién creados jardines, la materia médica pisará segura la senda de la botánica.

En 1544 se publica, en italiano, la primera edición del "Dioscórides" de Mattioli, los *Discorsi*, y con ellos una nueva forma de aproximarse a los clásicos. No se dispensa del obligado análisis filológico; tampoco se recluye en él. Esa versión contemplaba los cinco primeros libros de la *Materia médica.* Alcanzó un éxito inesperado y la hizo suya la Universidad de Padua. De Venecia, Bolonia, Verona, de Padua Siena y Roma le enviaron a Gorizia, donde residía, nuevos especímenes y observaciones.

Sacó, mejorada, una segunda edición, en 1548. Incorporó el sexto libro atribuido al anazarbeo sobre venenos y sus antídotos, un asunto muy sensible en una época en que las intoxicaciones fortuitas o buscadas eran frecuentes. Vino la tercera en 1550, a la que añadió tablas de pesos y medidas y de correlaciones entre enfermedad y simple asignado. La influencia de Mattioli se internacionalizaría con su edición latina, de 1554. La rehace a fondo y la ilustra.

En los recetarios contemporáneos, que sintetizaban la obra dioscorídea, se optaba siempre por el simple principal o el más accesible en el mercado. De las tres especies de





Mechero y cápsula de calcinación (siglos XVIII-XIX*). Museo de la farmacia hispana Facultad de Farmacia. Universidad Complutense, Madrid*



Balanza doble del Colegio de San Fernando de Madrid (siglo XIX*). Museo de la farmacia hispana Facultad de Farmacia. Universidad Complutense, Madrid*

"Achillea" citadas por Dioscórides —"aegyptica", "ptarmica" y "millefollium"— el *Ricettario Fiorentino* del tiempo de Mattioli indica sólo una con la denominación genérica de "milhojas"; de las 7 especies de "Artemisia", cita 3, probablemente las más importantes y las más usadas, es decir, el abrótano, el ajenjo y la artemisia vulgar. Para su manejo más seguro se recurre a los *Discorsi*, del que se vendieron decenas de miles de ejemplares.

Recoge el testigo, ahora con una óptica historiográfica, Evemarie Wolf en *Über die Anfänge der Pharmaziegeschichtsschreibung*, un trabajo de grado realizado en el Instituto de Historia de la Farmacia de Marburgo. Sigue la estela de los fundadores de la disciplina: Hermann Peters, Hermann Schelenz, Julius Berendes, Alexander Tschirch, Alfred Adlung y Georg Urdang.

La dependencia de la botánica y la introducción de la química al servicio de la salud definen el desarrollo de la farmacia en los siglos XVI y XVII. Con Mattioli la naturaleza depura la terapéutica humanista. Viviendo éste todavía, y a su imagen, Gulielmus Gratarolus enseña en Marburgo una medicina botánica asentada sobre la razón y la experiencia. Médicos y farmacéuticos herborizan montes y valles de Europa y las Indias.

Mientras tanto, las ideas de Paracelso prendían en círculos herméticos. A principios del XVII la química se esfuerza por independizarse. Lo adelanta en 1619 Daniel Sennert con *De Chymicorum cum Aristotelicis et Galenicis consensu ac dissensu*: "La química es por sí misma un arte, distinta de la medicina." Con los años, se despegará también de la farmacia.

Wolf epitomiza en Hermann Conring los años centrales del XVII. Profesor de la Universidad de Helmstedt, epistemólogo en *In universam artem medicam singulasque ejus partes introductio* y crítico de la alquimia en *De Hermetica Medicina*. Pergeña una periodización de la medicina que hará fortuna: de Hipócrates a Erasístrato y Herófilo; de éstos a Galeno; de Galeno a la época árabe; árabes; arabistas; Paracelso. Contra éste se muestra muy severo.

A finales del mismo siglo Christian Thomasius da a la estampa el *De iure circa Pharmacopolia Civitatum*, más centrado en los aspectos institucionales de los apotecarios como se desprende del propio título. Llega incluso a señalar el momento y el lugar de origen en que fueron apareciendo las distintas denominaciones de las profesiones vinculadas: "seplasiarii", "aromatarii", "medicamentarii", "pigmentarii", "confectionarii", "unguentarii", "apothecarii". Y resume la



Interior de la "Antigua Botica de la Corte" de Salzburgo (Austria)

militancia médica de su tiempo: "Unos son paracelsistas, llamados químicos por la gente, otros sólo reconocen a Galeno, los hay que se encuentran a medio camino entre ambos y, por último, aunque los menos, que se confiesan hipocráticos."

Conforme nos acercamos a la Ilustración se hace más nítida la autonomía de la química, cuyas etapas recorren Olaf Torbern Bergman en *De primordiis Chemiae* y *Historia chemiae medium aevum*, así como Johann Friedrich Gmelin en *Geschichte der Chemie seit dem Wiederaufleben der Wissenschaften bis an das Ende des 18. Jahrhunderts*. Mira éste el pasado a través de los mojones siguientes: árabes y arabistas, escolástica, Paracelso, eclécticos, Franz Sylvius de la Böe, y, por fin, Robert Boyle, Georg Ernst Stahl y Antoine Laurent Lavoisier.

En el día a día de la farmacia novohispana nos adentra *Learning to Heal* de Luz María Hernández. Desde los primeros instantes de la conquista, los españoles apreciaron los valores medicinales de la flora y fauna americanas. La *Historia Natural de Nueva España* de Francisco Hernández detalla la eficacia de 1200 plantas, catalogadas de acuerdo con sus cualidades galénicas (grados de calor, frío, humedad y sequedad). Si en la mente del europeo era la naturaleza la que, en definitiva, encerraba la clave de la enfermedad y la sanación a través de la dieta y los remedios simples y compuestos, para los nahuas el hombre formaba parte de un plan divino que abarcaba el universo entero, en cuyo esquema las deidades se encargaban de mantener un equilibrio general indispensable para el bienestar de la comunidad. Sus esfuerzos provocaban a veces las enfermedades. Cada tipo de enfermedad se atribuía a una deidad determinada y estaba vinculada con animales y plantas relacionada con la misma.

No obstante su magra base científica, la farmacia precolonial sobrevive en la colonial. A comienzos del XVIII Juan Esteyneffer retiene en su *Florilegio Medicinal* los nombres en náhuatl y dialectos locales de plantas y minerales. La situación tomará un nuevo giro en la última porción de la centuria ilustrada con las expediciones científicas, dirigida la de Nueva España por Martín Sessé, y la adopción de la farmacología de William Cullen.

Al repasar los inventarios de una botica mexicana del XVIII, nos llamará la atención la ordenada distribución de los suministros, en razón de su origen (vegetal, mineral, animal) o preparación (polvos, sales, ungüentos, jarabes, espíritus). No se han eliminado todos los elementos de superstición; aún queda alguna uña de la gran bestia para curar la epilepsia. Veremos catárticos estimuladores de la acción digestiva. De suaves a agresivos: laxantes (tamarindos, ciruelas y manzanilla), purgantes (aloe, ruibarbo, sulfato sódico) y drásticos (aceite de castor). Remedios que completaban con los eméticos ipecacuanha y sulfato de zinc. En la teoría humoral la limpieza interna constituía la piedra angular sobre la que se cimentaba el proceso curativo.

Para obtener una licencia de farmacia se requería conocer el latín, cuatro años de meritaje con un maestro ejerciente y un examen teórico y práctico. Durante ese período, el mancebo aprendía a reconocer, pesar, medir, guardar y preparar los medicamentos de acuerdo con lo prescrito en la *Pharmacopea Matritense*. Desde 1788 contaron con una formación botánica académica, de la que se responsabilizó el catedrático Vicente Cervantes.

Faltaban muy pocos años para que la farmacia experimentara su mayor transformación. La química orgánica y la fisiología experimental constituyeron, respectivamente, el agente remoto y próximo del alumbramiento de la

quimiofarmacia. El lector puede contemplar su trayectoria desde un prisma privilegiado, la conferencia Linacre dictada en 1946 por Sir Alexander Fleming: "Quimioterapia: ayer, hoy y mañana", que recupera *Fifty years of antimicrobials*.

Hasta mediados del XIX se desconocía la naturaleza bacteriana de las infecciones. Se hizo la luz cuando Pasteur demostró que ciertas fermentaciones se debían a la acción de los microorganismos, seres vivos que no surgían *de novo* a partir de material putrefacto. Si la putrefacción, dedujo Lister, la causaban microorganismos que procedían del exterior, había que prevenirla. Las recomendaciones antisépticas fomentaron la fabricación de agentes quimioterapéuticos para el tratamiento de infecciones locales.

Así surgió en 1910 el salvarsán de Paul Erlich para curar la sífilis provocada por *Treponema pallidum*. En la primera guerra mundial, los cirujanos se encontraron de repente con masas de heridos, infectadas en su mayoría. La infección primera procedía del suelo y de la ropa de los soldados, pero tras una semana en el hospital predominaban las causadas por estafilococos, estreptococos, colibacilos y bacilo de la difteria. Sobre esas heridas se echaban todo tipo de polvos en un intento por destruir los microorganismos. Sirvió de excelente paliativo el tratamiento de Carrell Dakin. El fluido de Dakin (hipoclorito sódico) se instilaba en las heridas cada dos horas.

En 1935 Gerhard Domagk demostró que el prontosil, componente de ciertas pinturas, mejoraba los ratones infectados con estrepococos. Un año más tarde se mostró su eficacia en septicemias estreptocócicas del hombre. Surgiría otro fármaco que controlaba una enfermedad bacteriana.

De la penicilina se hablaba antes de que se conocieran las sulfamidas. Pero no se logró producirla en suficiente concentración hasta 1940. Como es sabido, en 1928 una espora de moho contaminó una de las placas de cultivo del laboratorio de Fleming en el hospital Saint Mary, fenómeno que despertó su curiosidad. "Descubrí que ese ascomicete —*Penicillum*— creaba en su desarrollo un agente antibacteriano muy potente y selectivo, que denominé penicilina; esa sustancia, a diferencia de antisépticos precedentes, mataba las bacterias pero no era tóxica para los leucocitos humanos." Por falta de medios químicos no pudo alcanzar la concentración, mérito que corresponde a Howard Florey y Ernst B. Chain.

Podemos, por fin, compendiar la historia postrera de la farmacología en el tratamiento de la depresión. En la lucha contra la tuberculosis que los laboratorios farmacéuticos venían manteniendo desde los años cuarenta, Hoffmann-La Roche sintetizaron en 1951 el isoniazid e iproniazid, de eficacia comprobada. Pero el iproniazid presentaba efectos colaterales euforizantes, lo que obligó a retirarlo del mercado. Gracias, sin embargo, al interés de un psiquiatra de moda neoyorquino, Nathan Kline, el iproniazid se convertiría en el primer antidepresivo genuino. Kline publicó sus experiencias en 1956; dos años antes había aparecido la primera droga antipsicótica, la clorpromazina, y escasos meses después del descubrimiento de Kline, el primer fármaco antidepresivo tricíclico: la imipramina. A principios de los setenta se gesta la segunda generación de drogas antidepresivas. Por último, en las postrimerías de los ochenta se descubren los inhibidores de la reutilización de la serotonina: el prozac.

LUIS ALONSO

De los indivisibles

a los infinitésimos

FROM INDIVISIBLES TO INFINITESIMALS. STUDIES ON SEVENTEENTH-CENTURY MATHEMATIZATIONS OF INFINITELY SMALL QUANTITIES, por Antoni Malet. Universidad Autónoma de Barcelona; Bellaterra, 1996.

El trabajo se divide en seis capítulos. En los tres primeros y en el último, el autor pretende realizar un tipo de reflexión muy escaso en nuestras latitudes. Esta reflexión persigue situar con claridad de qué forma evolucionó el pensamiento de los matemáticos del siglo XVII —nos remite a Cavalieri, Torricelli, Pascal, Barrow, Wallis, Huygens, Gregorie y Newton— para transformar los *indivisibles* de Cavalieri en los *infinitesimales*, de uso más general.

Para comprender mejor el contenido de esta parte de la obra conviene recordar la distinción ya clásica —la podemos situar perfectamente en Grecia con las aportaciones de Eudoxio, Euclides y Arquímedes, y las de Demócrito, subrayadas por las paradojas de Zenón— entre indivisible e infinitésimo. Supongamos una superficie plana, limitada por una curva, un eje y una ordenada. Para determinar su área, podemos proceder de dos maneras. Suponer que la superficie "coincide con la *totalidad* de las líneas rectas, paralelas a la ordenada, que llenan la superficie". En este caso, bastará disponer de un método que permita computar "la totalidad de las líneas", teniendo en cuenta que, individualmente, cada línea tiene área nula. Sería, a pesar de que fue manejado por muchos de los matemáticos del siglo XVII, el método que surgiría en la escuela de Galileo, y cuyo exponente más notable fue Bonaventura Cavalieri.

Sin embargo este método conllevaba muchas contradicciones internas, y era difícil de justificar teóricamente, según pondrían de manifiesto detractores de Cavalieri, como Guldino, y también seguidores como Torricelli. Tales dificultades llevaron a los infinitésimos, que son elementos infinitamente pequeños de superficie: pequeños rectángulos que en su totalidad llenan la figura en cuestión. Es un problema realmente delicado seguir las pistas que llevaron a la transformación del primer concepto —o método de cálculo— al segundo. Esto es, precisamente, lo que ofrece la monografía de Antoni Malet. La exposición es muy cuidadosa, y se basa completamente en los textos de los autores a los que recurre para sustentar sus opiniones.

Pero además, realiza comparaciones entre distintos matemáticos en la forma de ver estas cuestiones, analizando sus semejanzas, aunque también sus discrepancias. Así por ejemplo, en el capítulo 3, compara los procedimientos seguidos por Gregorie y Newton, y la manera que tienen de justificar el principio de Cavalieri.

Los capítulos 4 y 5 están dedicados de una forma más específica a uno de los matemáticos que mejor ha estudiado, James Gregorie. En el capítulo 5, nos propone que leamos con él un manuscrito inédito [hasta que él lo estudió] en el cual el autor británico ofrece un método de integración en la línea de Cavalieri. Es uno de los cuatro métodos de integración seguidos por Gregorie. Finalmente, el capítulo 6 —más alejado del resto, hace que se pierda un poco el carácter unitario—, nos ofrece un estudio detallado del método de las tangentes que Gregorie desarrolló alrededor de 1670.

JOSEP PLA I CARRERRA

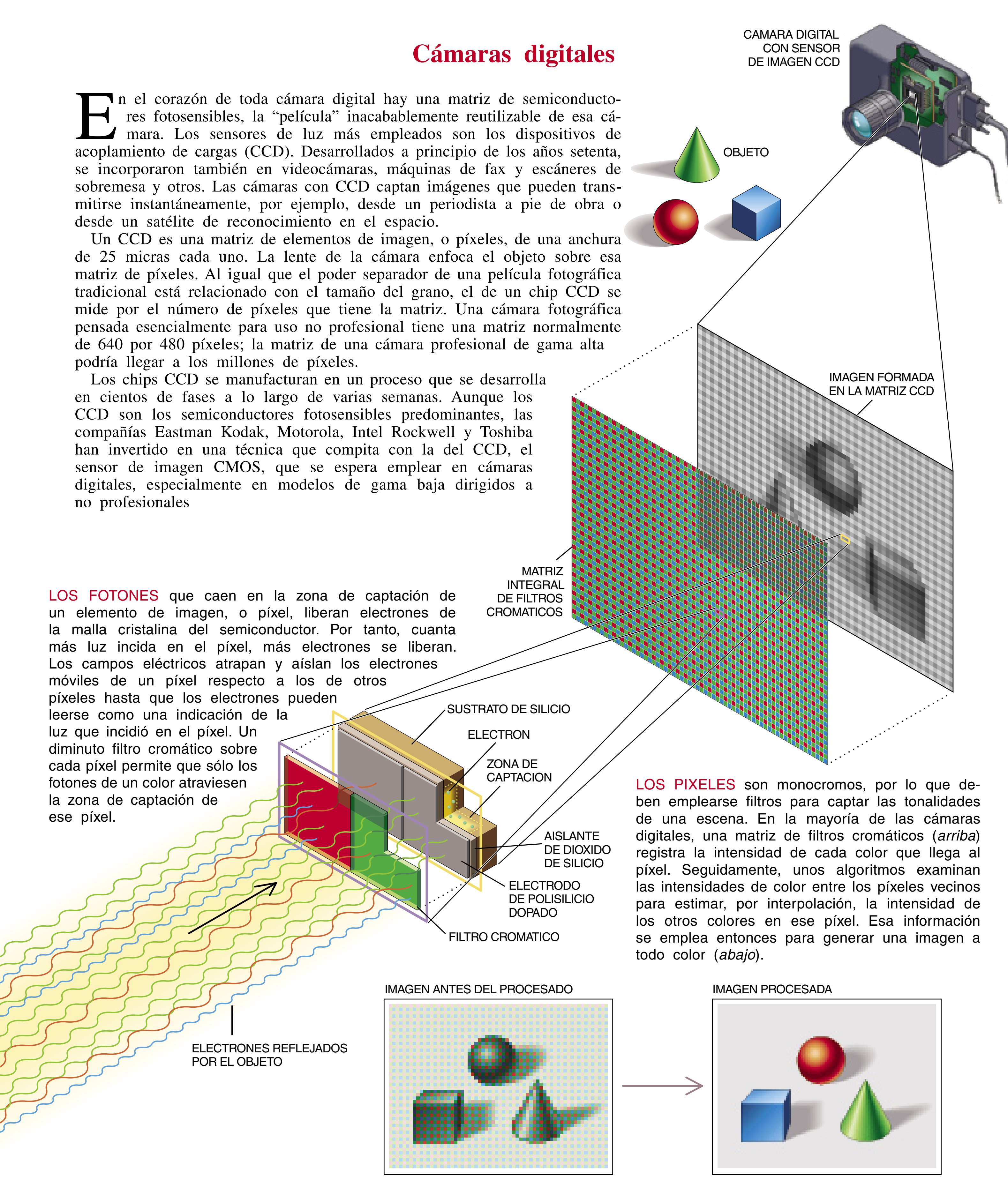
Michael D. McCreary

Cámaras digitales

En el corazón de toda cámara digital hay una matriz de semiconductores fotosensibles, la "película" inacabablemente reutilizable de esa cámara. Los sensores de luz más empleados son los dispositivos de acoplamiento de cargas (CCD). Desarrollados a principio de los años setenta, se incorporaron también en videocámaras, máquinas de fax y escáneres de sobremesa y otros. Las cámaras con CCD captan imágenes que pueden transmitirse instantáneamente, por ejemplo, desde un periodista a pie de obra o desde un satélite de reconocimiento en el espacio.

Un CCD es una matriz de elementos de imagen, o píxeles, de una anchura de 25 micras cada uno. La lente de la cámara enfoca el objeto sobre esa matriz de píxeles. Al igual que el poder separador de una película fotográfica tradicional está relacionado con el tamaño del grano, el de un chip CCD se mide por el número de píxeles que tiene la matriz. Una cámara fotográfica pensada esencialmente para uso no profesional tiene una matriz normalmente de 640 por 480 píxeles; la matriz de una cámara profesional de gama alta podría llegar a los millones de píxeles.

Los chips CCD se manufacturan en un proceso que se desarrolla en cientos de fases a lo largo de varias semanas. Aunque los CCD son los semiconductores fotosensibles predominantes, las compañías Eastman Kodak, Motorola, Intel Rockwell y Toshiba han invertido en una técnica que compita con la del CCD, el sensor de imagen CMOS, que se espera emplear en cámaras digitales, especialmente en modelos de gama baja dirigidos a no profesionales



LOS FOTONES que caen en la zona de captación de un elemento de imagen, o píxel, liberan electrones de la malla cristalina del semiconductor. Por tanto, cuanta más luz incida en el píxel, más electrones se liberan. Los campos eléctricos atrapan y aíslan los electrones móviles de un píxel respecto a los de otros píxeles hasta que los electrones pueden leerse como una indicación de la luz que incidió en el píxel. Un diminuto filtro cromático sobre cada píxel permite que sólo los fotones de un color atraviesen la zona de captación de ese píxel.

LOS PIXELES son monocromos, por lo que deben emplearse filtros para captar las tonalidades de una escena. En la mayoría de las cámaras digitales, una matriz de filtros cromáticos (*arriba*) registra la intensidad de cada color que llega al píxel. Seguidamente, unos algoritmos examinan las intensidades de color entre los píxeles vecinos para estimar, por interpolación, la intensidad de los otros colores en ese píxel. Esa información se emplea entonces para generar una imagen a todo color (*abajo*).